

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Měření spektra vf signálu spektrálním
analyzátozem – laboratorní úloha**
**RF Signal Spectrum Measurement with
Spectrum Analyzer – Laboratory Exercise**

2013

Hana Švidrnachová

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Zadání bakalářské práce

Student: **Hana Švidrnachová**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3901R039 Biomedicínský technik
Téma: **Měření spektra vf signálu spektrálním analyzátozem – laboratorní úloha**
RF Signal Spectrum Measurement with Spectrum Analyzer - Laboratory Exercise

Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s jednotlivými principy analýzy frekvenčního spektra s použitím spektrálního analyzátozu.
2. Návrh koncepce generátoru signálů pro úlohu měření frekvenčního spektra.
3. Návrh obvodového řešení generátoru signálů.
4. Návrh a realizace DPS pro navržený generátor signálů.
5. Oživení a testování realizovaného generátoru.
6. Vytvoření úlohy s realizovaným generátorem signálů včetně návodu do cvičení pro výuku měření se spektrálním analyzátozem.
7. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

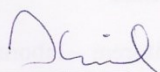
- [1] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření: Přístroje a metody*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2003. 337 s. ISBN 80-01-02731-7.
- [2] BARTUŠEK, Karel et al. *Měření v elektrotechnice*. 2. vyd. Brno: VUTUM, 2010. 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [3] NEVŘIVA, Pavel. *Analýza signálů a soustav*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000. 671 s. ISBN 80-7300-004-0.
- [4] NEVŘIVA, Pavel a Martin PIEŠ. *Signály a soustavy: učební text a návody do cvičení*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012. 293 s.
- [5] MALINA, Václav. *Poznááme elektroniku - Vysokofrekvenční technika*. 1. vyd. České Budějovice: KOPP, 2000. 343 s. ISBN 8-7232-114-5.
- [6] KRÍŠTAN, Luděk a Vladimír VACHALA. *Příručka pro navrhování elektronických obvodů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1982. 400 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

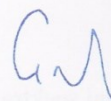
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Vladimír Kašík, Ph.D.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně.
Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

V Ostravě dne 7. 5. 2013



.....

Hana Švidnrochová

Poděkování

Touto cestou bych chtěla vyslovit poděkování panu Ing. Vladimíru Kašíkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky při vypracování mé bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je vytvořit laboratorní úlohu pro měření spektra vf signálů spektrálním analyzátozem. Zahrnuje praktickou výrobu generátoru signálů, jehož výstupy budou v rámci této úlohy využívány. Práce je rozdělena do několika částí, ve kterých jsou vysvětleny metody analýzy frekvenčního spektra s použitím spektrálních analyzátozů, a to jak analogových, tak digitálních. Dále je popsán generátor signálů, jeho návrh a realizace až po samotnou analýzu frekvenčního spektra generovaných signálů. Laboratorní úloha zahrnuje měření intenzity rádiového signálu rozhlasových stanic a měření frekvenčního spektra vf signálů pomocí osciloskopu výpočtem rychlé Fourierovy transformace a spektrálním analyzátozem založeným na heterodynním směšování signálů s filtrací. Studenti se tak naučí chápat souvislosti mezi zobrazením signálu v časové a frekvenční oblasti.

Klíčová slova

Spektrum, Frekvenční analýza, vf signál, Funkční generátor, XR-2206, Spektrální analyzátoz, Laboratorní úloha, Rychlá Fourierova transformace, Rozmítaný lokální oscilátor

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to create a laboratory exercise for RF signal spectrum measurement with using spectrum analyzer. It includes practical production of signals generator whose outputs are used within this exercise. The thesis is divided into several parts, where are explained the methods of frequency spectrum analysis with using analog and digital spectrum analyzers. There is also described the signals generator, the design and implementation through to the analysis of the frequency spectrum of generated signals. The laboratory exercise includes the measuring of radio signal intensity of radio stations and the measuring frequency spectrum of RF signals with using oscilloscope and calculation of fast Fourier transform and spectrum analyser based on heterodyne signals mixing with filtration. Students will learn to understand the connection between the display of the signal in time and frequency domains.

Key words

Spectrum, Frequency analysis, RF signal, Function generator, XR-2206, Spectrum analyzer, Laboratory exercise , Fast Fourier Transform, Swept local oscillator

Seznam použitých symbolů a zkratek

A/D	Analogově-digitální
C	Kapacita, [F]
DFT	Diskrétní Fourierova transformace
dB	Decibel, logaritmická stupnice
E	Energie signálu $w(t)$
EZ	Elektrické zařízení
FFT	Rychlá Fourierova transformace
FT	Fourierova transformace
FS	Fourierova řada
f	Frekvence, [Hz]
f_{vz}	Vzorkovací frekvence
f_{mf}	Mezifrekvenční kmitočet
I	Proud, [A]
N	Počet vzorků
n	Diskrétní časová proměnná, index
nf	Nízkofrekvenční
P	Výkon signálu $w(t)$
$P(\omega)$	Spojité spektrum výkonu signálu $w(t)$
$\{P(\omega)\}$	Diskrétní spektrum výkonu periodického signálu $w(t)$
R	Odpor, [Ω]
SA	Spektrální analyzátor
sf	Středofrekvenční
T_a	Základní perioda signálu, [s]
T_s	Perioda vzorkování, [s]
T_{vz}	Perioda vzorkování, [s]
t	Čas, [s]
U	Napětí, [V]
vf	Vysokofrekvenční
$w[n]$	Signál s diskretním časem
$w(t)$	Signál se spojitým časem
$W(\omega)$	Fourierova transformace signálu $w(t)$, spojité spektrum
$|W(\omega)|$	Spojité amplitudové spektrum
$\{w_m\}$	Diskrétní spektrum periodického signálu $w(t)$
$|w_m|$	Diskrétní amplitudové spektrum
W_m	Koeficient DFT
W_{max}	Amplituda signálu $w(t)$
ω	Úhlový kmitočet, [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
θ	Počáteční fáze, [rad]
$\theta(\omega)$	Spojité spektrum fáze signálu $w(t)$
$\{\theta_m\}$	Diskrétní spektrum fáze signálu $w(t)$

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Analýza frekvenčního spektra signálu	2
2.1	Signál	2
2.1.1	Klasifikace signálů	2
2.2	Principy analýzy frekvenčního spektra	4
2.2.1	Dirichletovy podmínky	5
2.2.2	Analýza Fourierovou transformací.....	5
2.2.3	Analýza Fourierovou řadou.....	7
2.2.4	Diskrétní spektra vzorkovaných signálů – FFT	8
2.3	Analýza spektrálními analyzátory	9
2.3.1	Analogové spektrální analyzátory	9
2.3.2	Digitální spektrální analyzátory	10
2.3.3	Základní charakteristiky spektrálních analyzátorů.....	11
3	Návrh koncepce generátoru signálů pro úlohu měření frekvenčního spektra.....	13
3.1	Funkční generátory.....	13
3.2	Principiální návrh generátoru signálů	13
3.3	XR-2206.....	14
4	Návrh obvodového řešení generátoru signálu.....	16
4.1	Úprava napájení	17
4.2	Nastavení frekvence	17
4.3	Regulace amplitudy.....	19
4.4	Úprava výstupů	19
5	Návrh a realizace DPS pro navržený generátor signálu.....	21
5.1	Návrh DPS	21
5.2	Realizace DPS a konstrukce generátoru signálu	22
6	Oživení a testování realizovaného generátoru	24
6.1	Oživení a nastavení tvaru výstupních průběhů signálů	24
6.2	Testování generovaných průběhů.....	25
6.2.1	Trojúhelníkový průběh.....	25
6.2.2	Sinusový průběh.....	26
6.2.3	Obdélníkový průběh.....	27
6.3	Frekvenční analýza.....	28

6.3.1	Sinusový průběh.....	28
6.3.2	Trojúhelníkový průběh.....	29
6.3.3	Obdélníkový průběh.....	30
7	Zhodnocení dosažených výsledků	32
8	Závěr	33
	Použitá literatura	34
	Příloha A – Návrh obvodového řešení	I
	Příloha B – Seznam použitých součástek.....	II
	Příloha C – Laboratorní úloha.....	III
	Příloha D – Vzorový protokol.....	VI

1 Úvod

Jednadvacáté století je často označováno jako informační věk. V přenosu zpráv, které jsou nositeli informací, zastávají elektrické signály svou nezaměnitelnou pozici. Setkáváme se s nimi ve všech oblastech techniky.

Práce s elektrickými signály je širokým oborem, ve kterém je zapotřebí jak teoretických znalostí, tak aplikačních dovedností. Vývoj moderních technologií je podmíněn pokrokem v této oblasti. Mezi základní metody, kterými lze signál zkoumat, patří spektrální analýza.

Jednou z možností její využití je v oblasti klinické medicíny. Uplatnění nachází např. při monitorování novorozenců nebo v prevenci civilizačních chorob. Spektrální analýza variability srdeční frekvence patří mezi významné metody popisující funkce autonomního nervového systému. Běžně se používá především u diabetické neuropatie a u pacientů po akutním infarktu myokardu ke stanovení prognózy.

Spektrální analyzátor má své oprávněné místo mezi základními nástroji každého elektrotechnika, pracujícího v oboru měřicí a řídicí techniky. Tato práce je věnována analýze analogových signálů, tedy signálů se spojitým časem, a to především popisu jejich vlastností ve frekvenční oblasti. Cílem práce je vytvořit laboratorní úlohu pro měření se spektrálním analyzátozem, která by mohla být aktivně využívána ve výukových předmětech specializovaných pro elektrická měření. Stěžejní část práce tvoří výroba generátoru signálů, jenž je využit v dané úloze.

Navrhovaný generátor signálů je analogový. Jeho ústřední částí je integrovaný obvod XR-2206, který při vhodném zapojení obvodových prvků samostatně generuje sinusový, obdélníkový a trojúhelníkový průběh. Návrh vychází především z doporučeného zapojení uvedeného v katalogovém listu XR-2206.

K analýze generovaných signálů je využito dvou typů přístrojů. V první řadě je to spektrální analyzátor založený na heterodynním směšování signálů s filtrací. Druhou volbou je digitální osciloskop. Moderní osciloskopy, které zobrazují signály primárně v časové oblasti, obsahují nyní možnost matematického výpočtu spektra pomocí algoritmu rychlé Fourierovy transformace.

2 Analýza frekvenčního spektra signálu

2.1 Signál

Signál je fyzikální vyjádření zprávy. Obsahuje informaci - část zprávy, která přináší příjemci nové poznatky. [1]

Signál může být reprezentován libovolnou fyzikální veličinou. V této souvislosti se pak mluví o signálech optických, akustických apod. Elektrickými signály rozumíme signály napěťové nebo proudové.

V teorii signálu se pro reálný signál se spojitým časem používá označení $w(t)$ vycházející z anglického slova waveform (časový průběh signálu). Rovněž se nepoužívají jednotky veličin. Ty nabývají na významu až ve chvíli, kdy je konkrétnímu signálu přiřazen fyzikální význam.

2.1.1 Klasifikace signálů

Signály mohou být klasifikovány z mnoha hledisek. Jedním z nich je klasifikace na základě určenosti jejich hodnoty v libovolném čase. Dále mohou být děleny podle spojitosti grafického vyjádření nebo průběhu funkce signálu. Vzhledem k frekvenční analýze jsou v teorii signálů rozděleny také podle hodnoty energie či výkonu, a to na energetické a výkonové signály.

Klasifikace signálů má úzkou souvislost s rozdělením elektrických zařízení, které s nimi pracují. Toto rozdělení je stanoveno v normě ČSN 33 0010.

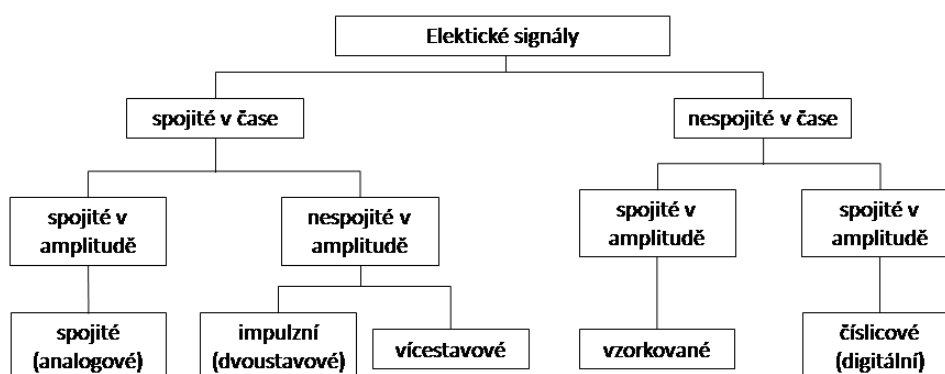
2.1.1.1 Podle určenosti hodnoty signálu v libovolném čase

Signály lze rozdělit na deterministické a stochastické podle toho, jak jsou jejich hodnoty definovány v libovolném čase.

- Deterministické signály mohou být přesně popsány funkcemi času tak, že lze určit jejich hodnoty v libovolném časovém okamžiku. Příkladem může být harmonický signál generovaný laboratorním zdrojem.
- Stochastické (náhodné) signály nelze předem matematicky nadefinovat. Příkladem může být šum elektrického zařízení nebo EKG srdce. [5]

2.1.1.2 Podle spojitosti

Podle grafického vyjádření elektrických signálů lze povést rozdělení na signály spojitě a nespojitě (diskrétní) a to jak v čase, tak v amplitudě. Přehled tohoto rozdělení je znázorněn na Obr. 1.



Obr. 1: Rozdělení elektrických signálů podle spojitosti.

- Signály spojité v čase i v amplitudě jsou nazývány analogové. Jejich hodnoty jsou v čase měněny souvisle, spojitě. Oproti tomu signály spojité v čase, ale nespojité v amplitudě, mění svoji hodnotu skokem a nabývají většinou konečný počet stavů.
- Signály nespojité v čase jsou časově posloupnosti hodnot. Jsou-li spojité v amplitudě, jedná se o vzorkované signály. Jsou-li nespojité i v amplitudě, jsou nazývány číslicovými (digitálními) signály. [2], [5]

2.1.1.3 Podle průběhu funkce signálu $w(t)$

Základní dělení signálů podle průběhu funkce $w(t)$ je na periodické a neperiodické (aperiodické). Mezi periodické patří harmonické signály. Mezi aperiodické patří signály kauzální a finitní. Na Obr. 2 jsou znázorněny jejich příklady.

- Periodické signály, jsou signály, které se po určité době začnou opakovat. Musí splňovat podmínku

$$w(t) = w(t + k \cdot T_a) \quad (1)$$

kde:

T_a je základní perioda signálu, [s], $T_a > 0$

k je celé číslo, $k = \dots -2, -1, 0, 1, 2 \dots$

t čas [s].

Všechny signály, které nesplňují tuto podmínku, jsou označovány jako aperiodické.

- Harmonické signály patří mezi signály periodické a lze je matematicky popsat jako

$$w(t) = W_{max} \cdot \cos(\omega \cdot t + \theta) \quad (2)$$

kde:

W_{max} je amplituda signálu

ω je úhlový kmitočet, [$rad \cdot s^{-1}$]

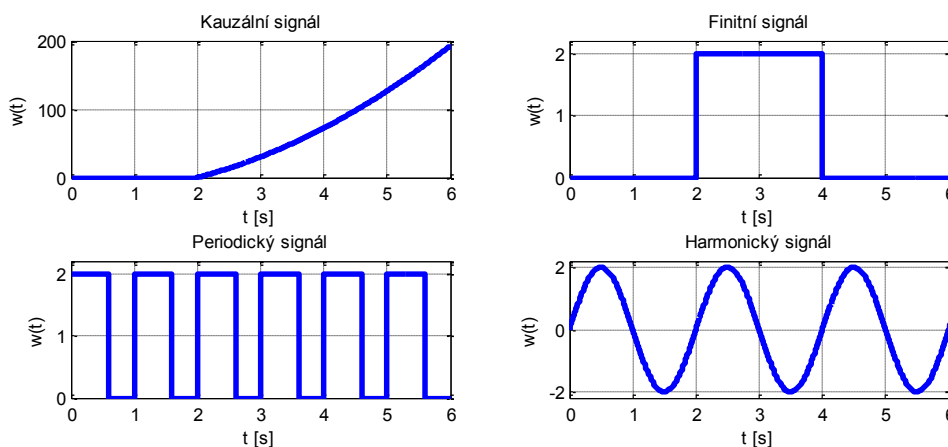
θ je počáteční fáze, [rad]

t čas, [s].

Je-li $\omega = 0$, pak $w(t)$ přechází v konstantní signál.

- Kauzální signály mají vždy definovaný počátek, do kterého je signál nulový. Pro $t < t_a$ platí $w(t) = 0$.
- Finitní signály jsou takové, které mají nenulové hodnoty pouze v časovém intervalu $t \in [t_a, t_b]$.

[5]



Obr. 2: Příklady signálů rozdělených podle průběhu funkce.

2.1.1.4 Podle energie a výkonu signálu

Energetický signál $w(t)$ je takový signál, jehož energie je nenulová a konečná. Splňuje tedy podmínky $E \neq 0$ a $E < \infty$, kde E je energie signálu. Jedná se většinou o impulsy konečného trvání (finitní signály). Pro energii E platí vztah:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} w^2(t) dt \quad (3)$$

Výkonový signál $w(t)$ je takový signál, jehož střední výkon je nenulový a konečný. Splňuje tedy podmínky $P \neq 0$ a $P < \infty$, kde P je výkon signálu. Jedná se většinou o periodické signály nebo signály náhodné, např. šum. Energie takového signálu je nekonečná. Pro střední výkon P platí vztah:

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} w^2(t) dt \quad (4)$$

[2]

2.1.1.5 Klasifikace elektrických zařízení

Elektrické signály samostatně nemají pevně stanovenou hranici pro klasifikaci podle frekvence. Normované jsou pouze elektrická zařízení sloužící jako médium pro jejich přenos.

Podle normy ČSN 33 0010 lze elektrická zařízení (EZ) rozdělit podle frekvence signálu, se kterým pracují. Rozdělení je uvedeno v Tab. 1.

Tab. 1: Rozdělení elektrických zařízení.

Název	Označení	Silová EZ	Sdělovací EZ
nízkofrekvenční	nf	$f < 60 \text{ Hz}$	$f < 9 \text{ kHz}$
středofrekvenční	sf	$60 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$	-
vysokofrekvenční	vf	$f > 10 \text{ kHz}$	$f > 9 \text{ kHz (do } 3 \text{ THz)}$

Za silová elektrická zařízení jsou považována taková, která slouží k výrobě, přeměně a rozvodu elektrické energie a k její přeměně v práci nebo jiný druh energie. Za sdělovací elektrická zařízení jsou považována taková, která slouží k přenosu, zpracování, záznamu a reprodukci informací v jakékoliv formě.

[3]

2.2 Principy analýzy frekvenčního spektra

Spektrum je označení různých souborů nebo vlastností veličiny nebo veličin, se kterými se pracuje v určitém uspořádání jako s celkem. V této práci je spektrem myšleno frekvenční spektrum signálu podle Fouriera.

Vzájemná souvislost mezi signálem v časové a ve frekvenční oblasti je popsána Fourierovou transformací (FT – z angl. Fourier Transform). Je používána především k analýze neperiodických signálů. Pro analýzu periodických signálů je využíváno Fourierových řad (FS – z angl. Fourier Series).

Spektrum signálu $w(t)$ je označována komplexní funkce reálné proměnné ω $W(\omega)$ v případě analýzy pomocí FT a nebo množina komplexních koeficientů Fourierovy řady $\{w_m\}$ v případě analýzy pomocí FS. Toto lze zapsat jako $W(\omega) = F\{w(t)\}$, popř. $\{w_m\} = FS\{w(t)\}$.

Každý fyzikálně realizovatelný signál, který splňuje tzv. Dirichletovy podmínky může být vyjádřen pomocí Fourierovy transformace (popř. pomocí Fourierovy řady, jedná-li se o signál periodický).

2.2.1 Dirichletovy podmínky

Dirichletovy podmínky jsou podmínky postačující k tomu, aby signál mohl být analyzován pomocí Fourierovy transformace, tj. popsán spojitým spektrem, popř. analyzován pomocí Fourierovy řady, tj. popsán diskretním spektrem.

2.2.1.1 Dirichletovy podmínky pro Fourierovou transformaci

Aby funkce $w(t)$ byla aproximovatelná Fourierovou transformací, tedy aby měla Fourierovo spojité spektrum, stačí aby současně platilo:

- $w(t)$ je na libovolném konečném časovém intervalu T absolutně integrovatelná, tj.

$$\int_c^{c+T} |w(t)| dt \leq K < \infty \quad (5)$$

kde K je konečná konstanta.

- $w(t)$ má na libovolném konečném časovém intervalu T konečný počet nespojitostí prvního řádu, tzn. má limitu zleva i zprava, přičemž tyto limity si nejsou rovny.
- $w(t)$ má na libovolném konečném časovém intervalu T konečný počet maxim a minim.

[2]

2.2.1.2 Dirichletovy podmínky pro Fourierovu řadu

Aby funkce $w(t)$ byla rozvinutelná do Fourierovy řady, stačí, aby platilo:

- $w(t)$ je na daném konečném časovém intervalu, respektive na periodě T_A , absolutně integrovatelná, tj.

$$\int_0^{T_A} |w(t)| dt \leq K < \infty \quad (6)$$

kde K je konečná konstanta.

- $w(t)$ má na daném konečném časovém intervalu, respektive na periodě T_A , konečný počet nespojitostí prvního řádu, tzn. má konečnou limitu zleva i zprava, přičemž tyto limity si nejsou rovny.
- $w(t)$ má na daném konečném časovém intervalu, respektive na periodě T_A , konečný počet maxim a minim.

[2]

2.2.2 Analýza Fourierovou transformací

Fourierova transformace (FT) je matematickým vyjádřením vzájemné souvislosti mezi signálem v časové a frekvenční oblasti. Fourierova transformace provede transformaci signálu $w(t)$ na spektrální funkci komplexní proměnné $W(\omega)$. Výsledné spektrum je spojitě a používá se většinou pro vyjádření frekvenční oblasti energetického, neperiodického signálu.

Klasický tvar FT v komplexním oboru:

$$W(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t) e^{-j\omega t} dt = F\{w(t)\} \quad (7)$$

$\omega \in (-\infty, \infty)$

kde:

$W(\omega)$	spektrální komplexní funkce reálné proměnné ω , dvoustranné spojitě spektrum signálu, Fourierova transformace
$w(t)$	analyzovaný signál
ω	úhlová frekvence, $[rad \cdot s^{-1}]$
t	čas, $[s]$

Signál vyjádřený jeho spektrem lze obnovit zpětnou Fourierovou transformací. Klasický tvar zpětné FT v komplexním oboru:

$$w(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) e^{j\omega t} d\omega = F^{-1}\{W(\omega)\} \quad (8)$$

$$t \in (-\infty, \infty)$$

kde:

$W(\omega)$	spektrální komplexní funkce reálné proměnné ω , dvoustranné spojité spektrum signálu, Fourierova transformace
$w(t)$	analyzovaný signál
ω	úhlová frekvence, $[rad \cdot s^{-1}]$
t	čas, $[s]$

Dvoustranné spojité spektrum amplitudy $|W(\omega)|$ signálu $w(t)$ má tvar:

$$|W(\omega)| = \sqrt{Re^2\{|W(\omega)|\} + Im^2\{|W(\omega)|\}} \quad (9)$$

Jedná se o sudou funkci a platí:

$$|W(\omega)| = |W(-\omega)| \quad (10)$$

Dvoustranné spojité spektrum fáze $\theta(\omega)$ signálu $w(t)$ má tvar:

$$\theta(\omega) = \arctg \frac{Im\{\theta(\omega)\}}{Re\{\theta(\omega)\}} \quad (11)$$

Jedná se o lichou funkci a platí:

$$\theta(\omega) = -\theta(-\omega) \quad (12)$$

Dvoustranné spojité spektrum energie $E(\omega)$ signálu $w(t)$ má tvar:

$$E(\omega) = |W(\omega)|^2 \quad (13)$$

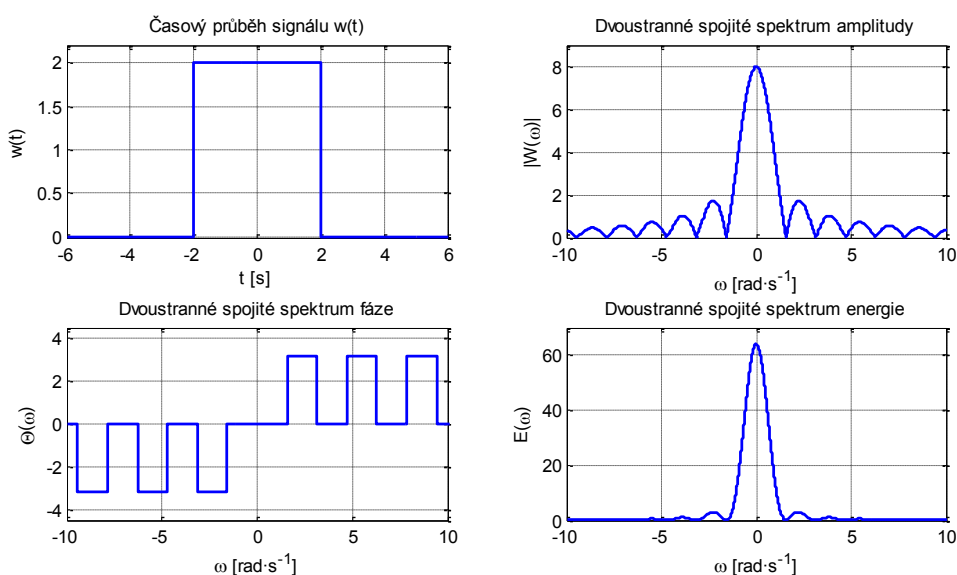
Dvoustranné spojité spektrum výkonu $P(\omega)$ signálu $w(t)$ má tvar:

$$P(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|W_T(\omega)|^2}{T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E_T(\omega)}{T} \quad (14)$$

kde:

$|W_T(\omega)|$	spojité spektrum energie signálu $w(t)$ za časový interval T
T	časový interval, $[s]$

[1], [6], [7]



Obr. 3: Příklad Fourierovy transformace energetického signálu $w(t)$.

2.2.3 Analýza Fourierovou řadou

Fourierova řada (FS) je, stejně jako Fourierova transformace, matematickým vyjádřením vzájemné souvislosti mezi signálem v časové a frekvenční oblasti. Fourierova řada aproximuje signál v daném časovém intervalu na koeficienty Fourierovy řady w_m . Výsledná množina těchto koeficientů tvoří spektrum, které je diskrétní a zapisuje se $\{w_m\} = FS\{w(t)\}$. Fourierova řada se používá především pro vyjádření frekvenční oblasti výkonového, periodického signálu. Koeficienty w_m lze určit ze vztahu:

$$w_m = \frac{1}{T_A} \int_0^{T_A} w(t) \cdot e^{-j\omega_m t} dt \quad (15)$$

kde:

w_m	komplexní koeficienty Fourierovy řady
T_A	základní perioda signálu
$w(t)$	signál
ω_m	$\omega_m = m \cdot \omega_A$, kde ω_A je základní úhlový kmitočet
m	celé číslo, $m = \dots -2, -1, 0, 1, 2 \dots$, označuje pořadí harmonické složky

Signál vyjádřený ve frekvenční oblasti lze z jeho diskrétního spektra obnovit. To lze zapsat jako $w_{FS}(t) = FS^{-1}\{w_m\}$ přičemž platí:

$$w_{FS}(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} w_m e^{j\omega_m t} \quad (16)$$

kde:

$w_{FS}(t)$ signál obnovený ze spektra $\{w_m\}$, $w_{FS}(t) \approx w(t)$

Dvoustranné diskrétní spektrum amplitudy $\{w_m\}$ signálu $w(t)$ je tvořeno posloupností:

$$\{|w_m|\} = \sqrt{\text{Re}^2\{w_m\} + \text{Im}^2\{w_m\}} \quad (17)$$

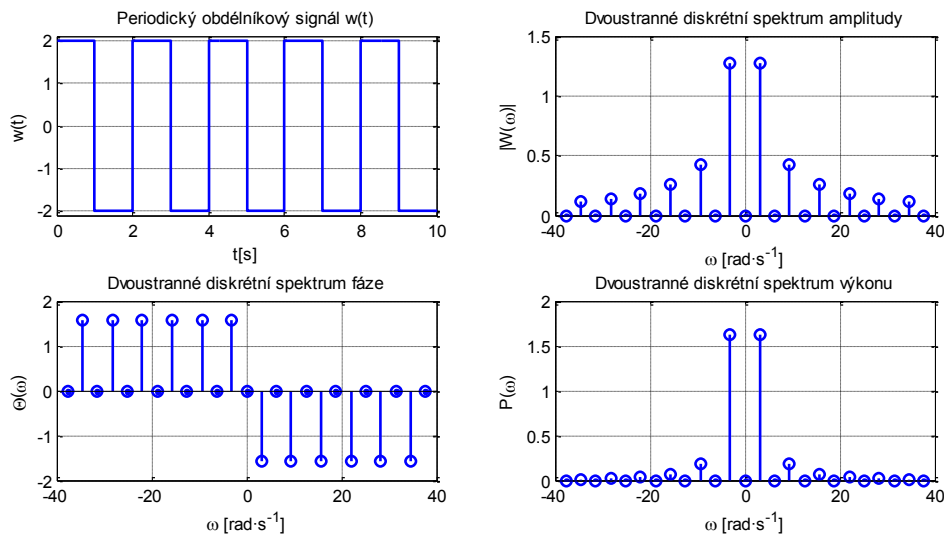
Dvoustranné diskrétní spektrum fáze $\{\theta_m\}$ signálu $w(t)$ je tvořeno posloupností:

$$\{\theta_m\} = \arctg \frac{\text{Im}\{w_m\}}{\text{Re}\{w_m\}} \quad (18)$$

Dvoustranné diskrétní spektrum výkonu $\{P_m\}$ signálu $w(t)$ je tvořeno posloupností:

$$\{P_m\} = \{|w_m|^2\} \quad (19)$$

[2], [7]



Obr. 4: Příklad Fourierovy řady periodického obdélníkového signálu $w(t)$.

2.2.4 Diskrétní spektra vzorkovaných signálů – FFT

Výpočty spekter mohou být prováděny způsobem analytickým, jenž byl popsán v předchozích dvou podkapitolách, nebo numerickým. Mezi často používané transformace numerického vyjádření signálu patří Diskrétní Fourierova transformace (DFT – z angl. Discrete Fourier Transform) a Rychlá Fourierova transformace (FFT – z angl. Fast Fourier Transform).

Vstupem je navzorkovaný periodický signál s diskretním časem $w[n]$ a výstupem je jeho diskretní spektrum.

DFT a FFT jsou algoritmy, které vypočítávají tzv. koeficienty W_m DFT signálu s diskretním časem $w[n]$. Ty pak lze použít k aproximaci numerického výpočtu Fourierova integrálu. Vztah pro výpočet koeficientů W_m DFT signálu s diskretním časem $w[n]$:

$$W_m = \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} w[n] e^{\frac{-j2\pi mn}{N}} \quad (20)$$

kde:

W_m	koeficient DFT
$w[n]$	signál s diskretním časem, $w[n] = w(nT_s)$, kde T_s je perioda vzorkování odpovídající Shannon-Kotělnikovu teorému.
N	počet vzorků
n	$n = \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$
m	$m = -\frac{N-1}{2}, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, \frac{N-1}{2}$

Aproximace numerického výpočtu Fourierova integrálu:

$$w_m = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} w(t) \cdot e^{-j\omega_m t} dt \cong \frac{1}{T} \sum_{n=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} w[n] e^{\frac{-j2\pi mn}{N}} T_s \cong \frac{T_s}{T} W_m = \frac{1}{N} W_m$$

$$w_m = \frac{1}{N} W_m \quad (21)$$

Pro určení diskretního spektra periodického signálu se spojitým časem $w(t)$ pomocí FFT je nejdříve vzorkována jedna perioda T signálu, $t \in \langle -\frac{T}{2}, \frac{T}{2} \rangle = \langle -\frac{N-1}{2} T_s, \frac{N-1}{2} T_s \rangle$ v N bodech. Výsledkem vzorkování je signál s diskretním časem $w[n]$, přičemž hodnoty se uloží vektoru $[w[0], w[1], w[2], \dots, w[N-1]]$. [2], [6]

Koeficienty W_m jsou periodické s periodou N , $W_m = W_{m+N}$. Koeficienty lze tedy získat i tak, že se vypočítají v jiné části signálu. FFT počítá koeficienty W_m od nuly do $N-1$:

$$W_m = \sum_{n=0}^{N-1} w[n] e^{\frac{j2\pi mn}{N}}, m = 1, 2, \dots, N \quad (22)$$

Výsledek se uloží do vektoru $[W[0], W[1], W[2], \dots, W[N-1]]$ a následně se přerovná do pořadí $[W[-\frac{N-1}{2}], W[-\frac{N-1}{2} + 1], \dots, W[0], \dots, W[\frac{N-1}{2}]]$. [2], [6]

Před provedením DFT neperiodického signálu je třeba provést jeho periodizaci. Ta se provádí pomocí okénkových funkcí. Například obdélníkovým oknem se vedle sebe „nakopíruje“ vybraný úsek signálu bez jakékoli další úpravy. Další funkcí je Hannovo okno, které upraví amplitudu signálu tak, aby úseky na sebe hladce navazovaly. [8]

FFT je často využívána v digitálních osciloskopech ke spektrální analýze zobrazovaných signálů.

2.3 Analýza spektrálními analyzátory

Spektrální analyzátory (SA) jsou přístroje, které dokážou určit frekvence obsažené ve vstupním signálu. Podle způsobu zpracování signálu je lze rozdělit na analogové a digitální.

Analogové spektrální analyzátory zobrazují pouze amplitudové spektrum signálu, jsou založené na heterodynním směšování signálů a využívají analogové filtrace signálu.

Digitální spektrální analyzátory umožňují zobrazit amplitudové a fázové spektrum a můžou je získávat dvojím způsobem. Jednou možností je využití číslicových kmitočtových filtrů, druhou je použití matematického výpočtu diskretní Fourierovy transformace prostřednictvím algoritmu FFT.

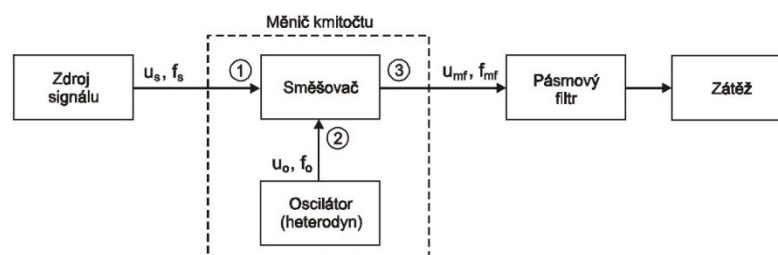
2.3.1 Analogové spektrální analyzátory

Analogové spektrální analyzátory nevyužívají matematických vztahů odvozených v podkapitole 2.2. Zobrazují pouze amplitudové frekvenční spektrum, které se získává pomocí analogových filtrů. Častou realizací je tzv. heterodynní spektrální analyzátor, jehož základním prvkem je směšovač. [10]

Směšovač je obvod, pomocí kterého se změní frekvence vstupního signálu na jinou hodnotu. Obecné schéma zapojení směšovače je zobrazeno na Obr. 5. Ve směšovači dochází ke směšování vstupního signálu u_s s frekvencí f_s a pomocného harmonického signálu u_o s frekvencí f_o přivedeného z oscilátoru (heterodynu). Výstupem je signál u_{mf} s harmonickými frekvencemi f_{mf} - tzv. mezifrekvenční kmitočty (IF – z angl. Intermediate Frequency). [12]

Rozdílové mezifrekvenční kmitočty: $f_{mf} = f_s - f_o$, $f_{mf} = f_o - f_s$.

Součtové mezifrekvenční kmitočty: $f_{mf} = f_s + f_o$.



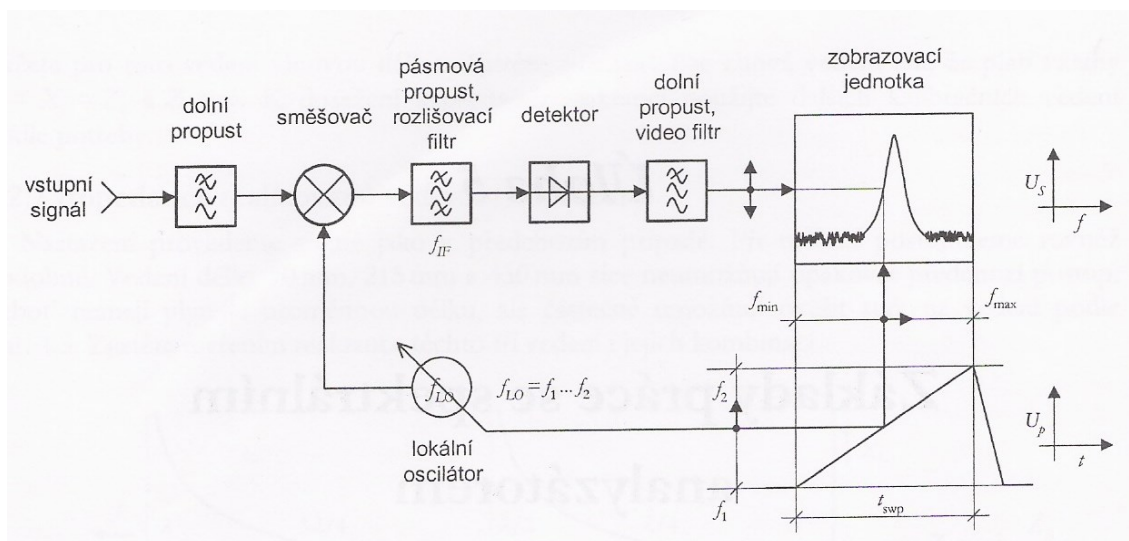
Obr. 5: Obecné zapojení směšovače. [12]

Z tohoto spektra je pásmovým filtrem vybrán pouze jeden mezifrekvenční kmitočet, přičemž ostatní jsou potlačeny. Ve spektrálních analyzátoch je použit filtr typu pásmová propust, který propustí rozdílový mezifrekvenční kmitočet $f_{mf} = f_o - f_s$. [9]

Na Obr. 6 je znázorněno principiální blokové schéma analogového spektrálního analyzátoru. Vstupní signál jako první prochází filtrem typu dolní propust, která odstraní nežádoucí rušení signálem mezifrekvenčního kmitočtu f_{mf} nebo signálem zrcadlového kmitočtu f_{zr} , kde $f_{zr} = f_s + 2f_{mf}$. [12]

Signál dále vstupuje do směšovače (angl. Mixer) spolu s harmonickým signálem z rozmítaného lokálního oscilátoru (angl. Swept local oscillator), v němž dojde k transpozici vstupního signálu o kmitočet f_{LO} , kde $f_o = f_{LO}$. Následuje mezifrekvenční rozlišovací filtr typu pásmová propust se střední frekvencí f_{IF} , kde $f_{IF} = f_{mf}$, který vybere úzké pásmo frekvenčních složek. Šířka tohoto filtru je volitelná a určuje schopnost analyzátoru rozlišit dva signály s blízkou frekvencí. [11]

Signál propuštěné frekvenční složky dále postupuje přes obálkový detektor, který určí jeho úroveň (amplitudu nebo efektivní hodnotu) a dolnopropustný video filtr, který potlačuje šumovou složku. [10], [11]



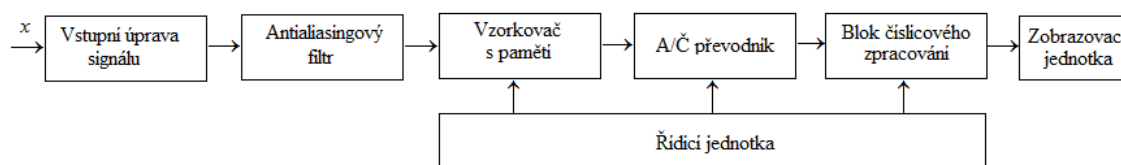
Obr. 6: Principiální blokové schéma analogového spektrálního analyzátoru. [11]

Signál z detektoru je nakonec přiveden na vertikální vychylovací obvody zobrazovací jednotky. Narazí-li se při přeladování oscilátoru na napětí, dojde k výchylce ve svislém směru, která bude úměrná velikosti vstupního napětí. Výsledkem je zobrazení úrovně signálu U_S . Horizontální vychylovací obvody jsou, podobně jako u analogového osciloskopu, řízené pilovitým napětím U_P . Generátor pilového napětí navíc rozmítá lokální oscilátor. Vodorovná výchylka je tak úměrná frekvenci, na kterou je oscilátor naladěn. [11]

Novější analogové spektrální analyzátorů obsahují digitální část. Detektor měřící amplitudu mezifrekvenčního signálu je nahrazen A/D převodníkem, který umožní následné digitální zpracování signálu. [9]

2.3.2 Digitální spektrální analyzátorů

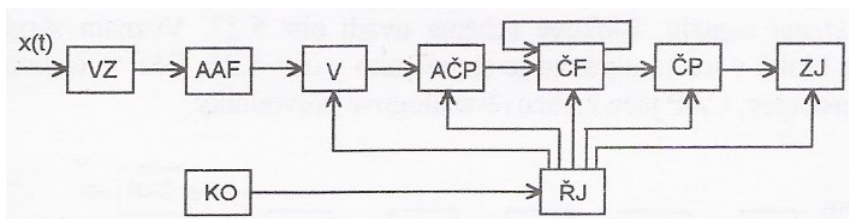
Digitální spektrální analyzátorů využívají číslicové (digitální) zpracování signálu. Jejich blokové schéma odpovídá Obr. 7. Analogový vstupní signál x je nejdříve zesílen nebo zeslaben na požadovanou úroveň a antialiasingovým analogovým filtrem typu dolní propust jsou odstraněny frekvenční složky nad polovinou vzorkovací frekvence f_{vz} . Signál je poté vzorkován se vzorkovací periodou $T_{vz} = \frac{1}{f_{vz}}$ a kvantován, tj. převeden na posloupnost číselných hodnot, pomocí A/D převodníku. Následně je signál číslicově zpracován a výsledek je zobrazen číslicovou zobrazovací jednotkou. Způsob digitálního zpracování závisí na tom, o jaký typ spektrálního analyzátorů se jedná. [10]



Obr. 7: Obecné schéma digitálního spektrálního analyzátorů.

2.3.2.1 Spektrální analyzátor s číslicovými kmitočtovými filtry

Blokové schéma spektrálního analyzátoru používajícího číslicové filtry je na Obr. 8. V tomto obrázku je: VZ – vstupní zesilovač, AAF – antialiasingový filtr, V – vzorkovač s pamětí, AČP – analogově-číslcový převodník, ČF – číslicový filtr, ČP – číslicová paměť, ZJ – zobrazovací jednotka, KO – krystalový oscilátor a ŘJ – řídicí jednotka.

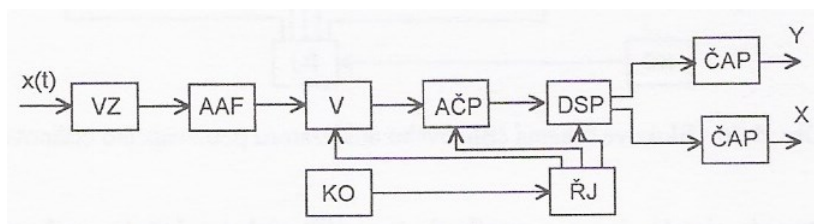


Obr. 8: Blokové schéma spektrálního analyzátoru používajícího číslicové filtry. [10]

V těchto analyzátorech jsou obsaženy číslicové filtry typu přeladitelná pásmová propust a dolní propust. Přeladování se děje změnou jejich koeficientů. [10]

2.3.2.2 FFT spektrální analyzátor

Blokové schéma FFT spektrálního analyzátoru je na Obr. 9. V tomto obrázku je: VZ – vstupní zesilovač, AAF – antialiasingový filtr, V – vzorkovač s pamětí, AČP – analogově-číslcový převodník, DSP – číslicový signálový procesor, ČAP – číslicově-analogový převodník, KO – krystalový oscilátor a ŘJ – řídicí jednotka.



Obr. 9: Blokové schéma FFT spektrálního analyzátoru. [10]

V těchto analyzátorech jsou obsaženy speciální mikroprocesory, tzv. číslicové signálové procesory (DSP), které jsou specializované na matematické operace a umožňují zpracování dat v reálném čase (změny na vstupu se prakticky okamžitě projeví na výstupu). DSP velmi rychle provádí výpočet koeficientů Fourierovy transformace algoritmem FFT, který je popsán výše v podkapitole 2.2.4. FFT analyzátor navíc kromě amplitudového spektra mohou poskytovat i fázové spektrum signálu. [9], [10]

Nyní mají moderní digitální osciloskopy také možnost měření frekvenčního spektra. Obsahují volbu matematické operace FFT, která spektrum vypočítá přímo ze signálu zobrazeného na obrazovce osciloskopu.

2.3.3 Základní charakteristiky spektrálních analyzátorů

Frekvenční rozsah spektrálního analyzátoru je maximální pásmo frekvencí, které analyzátor dokáže zobrazit. Rozsah se různí podle typu přístroje. V současné době jsou dostupné analyzátor, jejichž horní hranice rozsahu přesahuje 10 GHz.

Při praktickém měření se nastavuje užší pásmo frekvencí, které se zobrazuje na obrazovce přístroje. Některé analyzátor toto umožňují provést přímo nastavením první a poslední

zobrazené frekvence. Dalším způsobem je nastavení centrální frekvence a rozpětí, přičemž hodnota rozpětí se rovná rozdílu poslední a první zobrazené frekvence.

Frekvence je zobrazována na horizontální ose obrazovky. Dělení stupnice bývá u FFT analyzátorů lineární, u analyzátorů pracujících s filtrací signálů logaritmické.

Úroveň amplitudy frekvenčních složek je zobrazována na vertikální ose. Jednotlivé přístroje umožňují různé nastavení jejích jednotek. Patří mezi ně dBm, dBmV, dBμV, V a u některých analyzátorů i W.

Logaritmická stupnice umožňuje pracovat s hodnotami veličin, které se nacházejí ve velikých rozsazích. Míra decibel je zde používána pro vyjádření měřené veličiny vzhledem k určité referenční hodnotě. Jednotka dBm je výkonová úroveň signálu P měřená v decibelech dB vyjádřených vzhledem k 1 mW, přičemž výkon je vztažen ke jmenovité hodnotě vstupní impedance analyzátoru (obvykle 50 Ω). Platí:

$$\text{Úroveň signálu v dBm} = 10 \log \left(\frac{P [W]}{10^{-3} [W]} \right) \quad (23)$$

Jednotka dBmV je napětěová úroveň signálu U měřená v dB vyjádřených vzhledem k 1 mV. Je odvozena od výkonové úrovně a platí:

$$\text{Úroveň signálu v dBmV} = 20 \log \left(\frac{U [V]}{10^{-3} [V]} \right) \quad (24)$$

Stejný vztah platí pro jednotku dBμV s tím rozdílem, že referenční hodnota napětí není 1 mV, ale 1 μV. [2], [16]

Dalším parametrem spektrálních analyzátorů je dynamický rozsah (DR) udávaný v jednotkách dB. Platí:

$$\text{DR v dB} = 10 \log \left(\frac{P_{\max} [W]}{P_{\min} [W]} \right) = 20 \log \left(\frac{U_{\max} [V]}{U_{\min} [V]} \right) \quad (25)$$

Jedná se o poměr výkonu nejmenšího a největšího signálu současně přítomných na vstupu analyzátoru, které mohou být měřeny s určitým stupněm přesnosti. Minimální hodnota je určena šumovým prahem. [16]

Čas, za jaký dokáže analogový SA proměřit spektrum, závisí na době rozmítání, nastaveném frekvenčním rozpětí a na rozlišení šířky pásma. Matematicky to lze vyjádřit jako:

$$\text{Doba měření [s]} = \frac{\text{rozlišení šířky pásma [Hz]} \cdot \text{doba rozmítání [s]}}{\text{frekvenční rozpětí [Hz]}} \quad (26)$$

Rozlišení šířky pásma je šířka filtru, který je použit za směšovačem a doba rozmítání je čas, po který trvá lokálnímu oscilátoru přeladit se přes nastavené frekvenční rozpětí. [16]

3 Návrh koncepce generátoru signálů pro úlohu měření frekvenčního spektra

Pro úlohu měření frekvenčního spektra je zvolen funkční generátor s analogovým zpracováním signálu, který poskytuje sinusový, trojúhelníkový a pravoúhlý signál. Jádrem celého zařízení je tvořeno monolitickým integrovaným obvodem, který při doplnění vhodnými obvodovými součástkami dokáže tyto signály generovat přímo.

3.1 Funkční generátory

Analogovým zpracováním signálů lze pomocí funkčních měničů vytvořit poměrně jednoduché generátory, které zpravidla umožňují vytvářet pilové, pravoúhlé a harmonické kmity. Můžou být z části tvořené integrovanými obvody. Přehled některých IO, jenž by mohly být použity jako základní prvek, je v Tab. 2. Takové generátory obvykle neobsahují samostatné oscilátory každého průběhu, ale využívají například komparátorů, integrátorů a sinusových tvarovačů. [12]

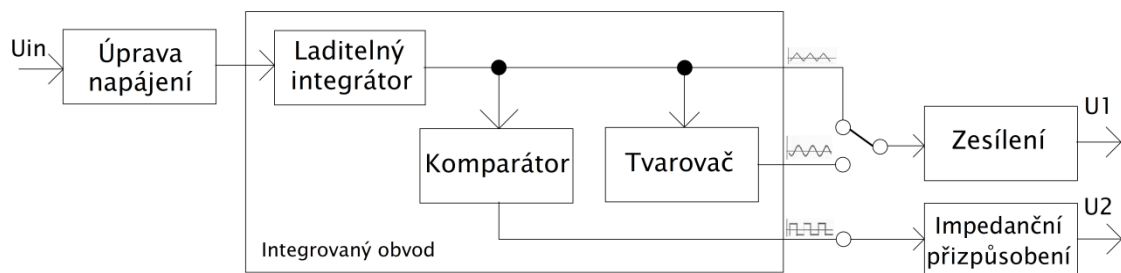
Tab. 2: Přehled IO použitelných jako základní prvek funkčního generátoru.

IO	Výrobce	Frekvenční rozsah	Způsob generování signálů	Generované průběhy	Orientační cena [Kč]
XR-2206	Exar	> 1 MHz	analogový	sinus, trojúhelník, obdélník, puls, rampa	125,-
ICL8038	Intersil	> 300 kHz	analogový	sinus, obdélník, trojúhelník, pila, puls	395,-
LTC1799	Linear Technology Corporation	1 kHz – 30 MHz	analogový	obdélník	178,-
MAX038	Maxim	0,1 Hz – 20 MHz	analogový	sinus, trojúhelník, pila, obdélník, puls	již se nevyrábí

K sestavení generátoru signálů za účelem vytvoření laboratorní úlohy pro měření se spektrálním analyzátozem byl vybrán integrovaný obvod XR-2206 firmy Exar. Hlavními důvody byly především rozsah generovaného signálů nad 1 MHz a jeho příznivá cena.

3.2 Principiální návrh generátoru signálů

Návrh generátoru signálů se sestává z několika bloků. Jádrem je integrovaný obvod generující sinusový, trojúhelníkový a obdélníkový průběhů. Generování jednotlivých průběhů se odvíjí od trojúhelníkového signálu. Obdélníkový signál je vytvořen pomocí komparátoru, sinusový pomocí tvarovače. Úpravu vstupního napájení U_{in} zajišťuje první blok návrhu. Obdélníkový signál má samostatný výstup U_2 a je impedančně přizpůsoben k připojení ke spektrálnímu analyzátoru. Sinusový a trojúhelníkový signál je zesílen a veden na výstup U_1 , který je pro oba signály společný.



Obr. 10: Principiální návrh generátoru signálů.

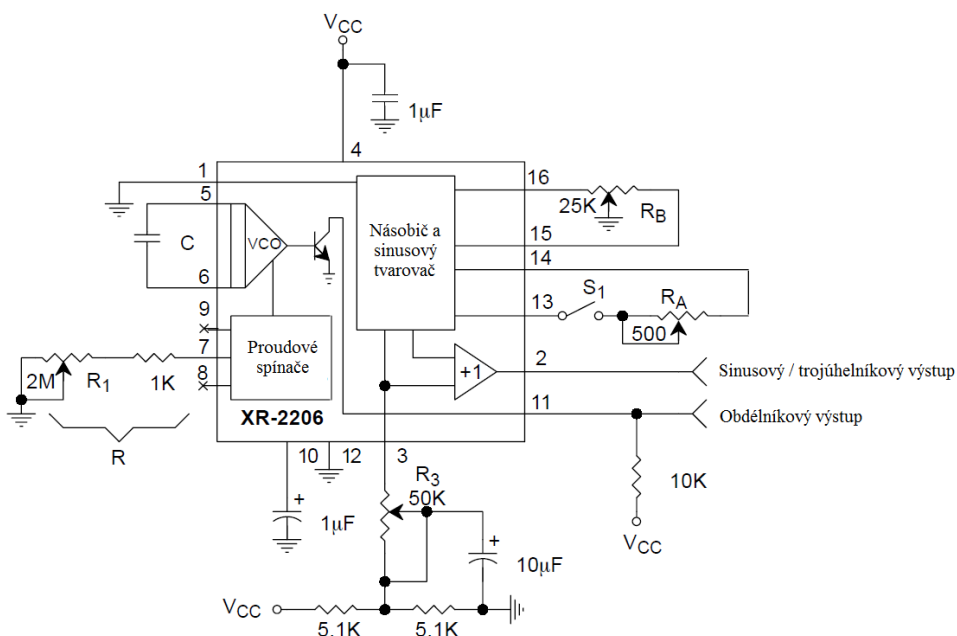
3.3 XR-2206

Na Obr. 11 je uvedeno zapojení obvodu doporučené výrobcem. Současně je v něm blokovně znázorněna jeho vnitřní struktura.

Obvod generuje tři průběhy – trojúhelníkový, sinusový a obdélníkový a skládá se ze čtyř funkčních bloků – napětím řízený oscilátor (VCO), analogového násobiče a sinusového tvarovače, zesilovače a sady proudových spínačů. Základem je VCO, který produkuje frekvenci úměrnou vstupnímu proudu, který je určen rezistory připojenými mezi vývod 7 a zem. Výstupem oscilátoru je obdélníkový nebo trojúhelníkový signál. [4]

Sinusový signál je generován pomocí tvarovače. To je obvod s nelineární a definovanou závislostí výstupního napětí na vstupním. Při tvarování je signál nahrazen několika přímkovými úseky, ve kterých je sinusový signál přibližně přímo úměrný trojúhelníkovému. Tvarovací obvod je realizován pomocí rezistorů a diod. [10], [12]

XR-2206 dále obsahuje vnitřní NPN tranzistor, jehož výstup je typu otevřený kolektor a vede na vývod 11. K vývodu je proto nutné přidat pull-up rezistor a připojit ho k napájecímu napětí.



Obr. 11: Zapojení obvodu doporučené výrobcem XR-2206.

V Tab. 3 jsou popsány jednotlivé vývody IO. Obdélníkový průběh lze odebírat z výstupu 11. Sinusový nebo trojúhelníkový průběh lze odebírat z vývodu 2 v závislosti na tom, jestli jsou

vývody 13 a 14 propojeny či nikoliv. V případě propojení je do obvodu zapojen tvarovač. Je-li spínač sepnut, obvod je uzavřen a výstupem je sinusový signál. [4]

Doporučené zapojení je výrobcem navrženo ke generování minimálně zkresleného sinusového průběhu. Nastavením zkreslení tvaru signálu trimrem R_A a nastavením symetrie trimrem R_B lze docílit činitele harmonického zkreslení (THD) až 0,5 %. Trimrem R3 se nastaví optimální výstupní rozkmit signálu. Výstupní frekvence f je určena hodnotou kapacity C kondenzátoru zapojeného mezi vývody 5 a 6 a zároveň hodnotou odporu R rezistoru zapojeného mezi vývod 7 a zem. Frekvence je určena vztahem:

$$f = \frac{1}{CR} \quad (27)$$

Pro nejlepší teplotní stabilitu výrobce doporučuje tyto hodnoty volit z rozmezí 1000 pF až 100 μF pro kapacitu a 4 kΩ až 200 kΩ pro odpor. Vyšších frekvencí lze dosáhnout volbou nižších hodnot odporů a kapacit. V případě nesymetrického napájení se může napájecí napětí pohybovat v rozmezí 10 až 26 V. Typická velikost napájecího proudu je 14 mA, maximální povolená hodnota je 20 mA. [4]

Tab. 3: Popis vývodů integrovaného obvodu XR-2206.

Číslo vývodu	Symbol	Popis
1	AMSI	Vstup modulačního signálu pro amplitudovou modulaci.
2	STO	Výstup sinusového nebo trojúhelníkového průběhu.
3	MO	Výstup násobiče.
4	VCC	Kladné napájecí napětí.
5	TC1	Vstup časovacího kondenzátoru.
6	TC2	Vstup časovacího kondenzátoru.
7	TR1	Výstup časovacího rezistoru 1.
8	TR2	Výstup časovacího rezistoru 2.
9	FSK1	Vstup pro klíčování posunem frekvence - frekvenční modulace.
10	BIAS	Vnitřní napěťová úroveň – výstup.
11	SYNCO	Synchronizační výstup.
12	GND	Zemnicí vývod.
13	WAVEA1	Vstup 1 pro nastavení tvaru vlny.
14	WAVEA2	Vstup 2 pro nastavení tvaru vlny.
15	SYMA1	Vstup 1 pro nastavení symetrie vlny.
16	SYMA2	Vstup 2 pro nastavení symetrie vlny.

4.1 Úprava napájení

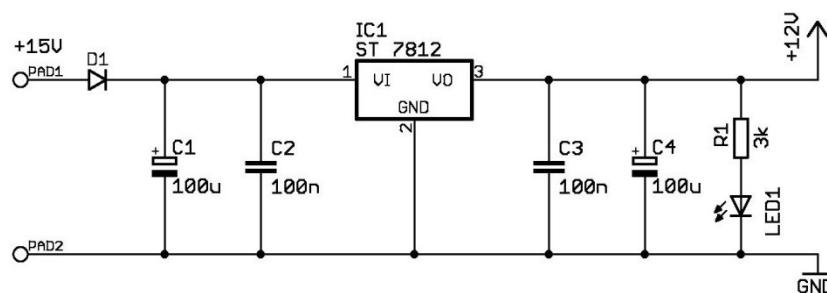
Napětí přivedené mezi vývody 12 a 4 IO2 se dle výrobce může pohybovat v rozmezí 10 až 26 V. Obvodové schéma je navrženo tak, aby mezi těmito vývody byla hodnota napětí 12 V. Za tímto účelem je použit integrovaný obvod ST 7812. Při hodnotě vstupního napětí 14,5 až 27 V zajišťuje výstupní napětí v rozmezí 11,4 až 12,6 V, typicky 12 V. Výstupní klidový proud je v tomto případě 5 mA až 1 A. Stabilizátor má vestavěnou ochranu proti zkratu a tepelnou pojistku.

Navržený generátor signálu potřebuje ke své funkci nesymetrický zdroj stejnosměrného napětí. Vzhledem k použitému stabilizátoru, je zvolena hodnota napájecího napětí celého obvodu 15 V.

Dioda D1 je do obvodu zařazena jako ochranný prvek při nesprávném zapojení napájecích svorek. V případě přepólování napájení je dioda zapojena v závěrném směru a obvodem neprochází proud.

Keramické kondenzátory C2 a C3 fungují jako blokovací kondenzátory k odrušení a zabránění rozkmitání stabilizátoru. Elektrolytické kondenzátory C1 a C4 slouží k filtraci vstupních a výstupních napětí.

Dioda LED1 má zelenou barvu a slouží k signalizaci napájení. Je k ní do série zařazen rezistor R1, přičemž volbou velikosti jeho odporu 3 k Ω , je snížena zářivost diody.



Obr. 13: Úprava napájení.

4.2 Nastavení frekvence

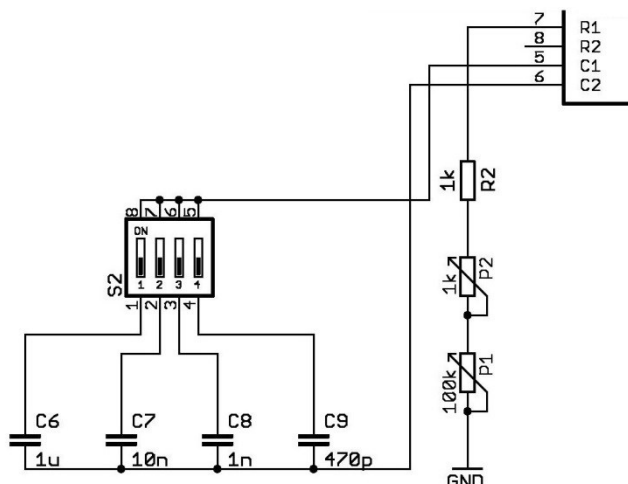
VCO uvnitř IO produkuje výstupní frekvenci úměrnou velikosti proudu I_f , který je nastaven rezistory připojenými mezi vývod 7 a zem. Proud I_f může nabývat hodnot od 1 μ A do 3 mA.

Vývod 7 je vnitřně nastaven na $U_f = +3V$ vzhledem k vývodu 12, jenž je spojen se zemí. Úpravou vztahu (27) lze tuto závislost vyjádřit následovně:

$$f = \frac{1}{RC} = \frac{I_f}{U_f C} = \frac{I_f}{3C} \quad (28)$$

Generátor pokrývá pásmo frekvencí 10,9 Hz až 1,4 MHz ve čtyřech rozsazích (Tab. 5). Frekvenční rozsahy se volí přepínačem S2 přepínáním kondenzátorů C6 až C9 o hodnotách kapacit 1 μ F, 10 nF, 1 nF, 470 pF. Pro volbu frekvence je určen zejména potenciometr P1 s odporem 100 k Ω . Potenciometr P2 s hodnotou odporu 1 k Ω , je určen k jemnému nastavení frekvence. Jeho význam se výrazněji projevuje ve frekvencích nad 400 kHz.

Ze vztahu (27) vyplývá hyperbolické nastavení frekvence. Aby se dosáhlo přibližně lineárního nastavení, je v zapojení použito logaritmických potenciometrů.



Obr. 14. Nastavení frekvence signálu.

Výpočet frekvenčních rozsahů vychází ze základního vztahu (27). Minimální a maximální frekvence jsou dané mezními hodnotami odporu potenciometrů P1 a P2:

$$f_{max} = \frac{1}{C_X R_2} \quad (29)$$

$$f_{min} = \frac{1}{C_X (R_2 + P_1 + P_2)} \quad (30)$$

kde:

$C_X \dots C_6 = 1\mu F$ pro 1. rozsah

$C_7 = 10 nF$ pro 2. rozsah

$C_8 = 1nF$ pro 3. rozsah

$C_9 = 470 pF$ pro 4. rozsah

$R_2 = 1 k\Omega$

$P_1 = 100 k\Omega$

$P_2 = 1 k\Omega$

Výpočet 1. frekvenčního rozsahu:

$$f_{max} = \frac{1}{C_6 R_2} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3} = 1 kHz$$

$$f_{min} = \frac{1}{C_6 (R_2 + P_1 + P_2)} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-6} (10^3 + 100 \cdot 10^3 + 10^3)} = 9,8 Hz$$

Výpočet 2. frekvenčního rozsahu:

$$f_{max} = \frac{1}{C_7 R_2} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-9} \cdot 10^3} = 100 kHz$$

$$f_{min} = \frac{1}{C_7 (R_2 + P_1 + P_2)} = \frac{1}{10 \cdot 10^{-9} (10^3 + 100 \cdot 10^3 + 10^3)} = 980,4 Hz$$

Výpočet 3. frekvenčního rozsahu:

$$f_{max} = \frac{1}{C_8 R_2} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-9} \cdot 10^3} = 1 MHz$$

$$f_{min} = \frac{1}{C_8 (R_2 + P_1 + P_2)} = \frac{1}{1 \cdot 10^{-9} (10^3 + 100 \cdot 10^3 + 10^3)} = 9,8 kHz$$

Výpočet 4. frekvenčního rozsahu:

$$f_{max} = \frac{1}{C_9 R_2} = \frac{1}{470 \cdot 10^{-12} \cdot 10^3} = 2,1 MHz$$

$$f_{min} = \frac{1}{C_9 (R_2 + P_1 + P_2)} = \frac{1}{470 \cdot 10^{-12} (10^3 + 100 \cdot 10^3 + 10^3)} = 20,9 kHz$$

Tab. 4: Vypočtené frekvenční rozsahy generovaných signálů.

Rozsah	Min. frekvence	Max. frekvence
1	9,8 Hz	1 kHz
2	980, 4 Hz	100 kHz
3	9,8 kHz	1 MHz
4	20,9 kHz	2,1 MHz

V Tab. 4 jsou uvedené vypočtené frekvenční rozsahy. Tyto hodnoty se liší od těch, které jsou skutečně generovány (Tab. 5). Rozdíly v rozsazích jsou dány zejména vlivem tolerance použitých součástek, které jsou u rezistoru R_2 1 %, potenciometrů P_1 a P_2 20 % a u kondenzátorů C_6 až C_9 10 %. Nejvíce patrný rozdíl je u 4. rozsahu, kde je maximální skutečně generovaná frekvence pouze 1,4 MHz namísto vypočtené 2,1 MHz. Avšak pro 4. rozsah byl použit kondenzátor C_9 s kapacitou 470 pF, což je nižší hodnota, než doporučuje výrobce. Tato hodnota byla vybrána za účelem generování vyšších frekvencí.

Tab. 5: Reálné frekvenční rozsahy generovaných signálů.

Rozsah	Min. frekvence	Max. frekvence
1	10,6 Hz	936,5 Hz
2	1,05 kHz	90,3 kHz
3	11,5 kHz	794 kHz
4	24,5 kHz	1,4 MHz

4.3 Regulace amplitudy

V případě obdélníkového průběhu je generován stejnosměrný signál s pevnou hodnotou amplitudy 11 V.

Sinusový / trojúhelníkový průběh je střídavý signál. Amplituda je ovlivnitelná trimrem P_3 , který je spojen s napěťovým děličem tvořeným rezistory R_3 a R_4 s hodnotou odporu 5,1 k Ω . Kondenzátor C_{10} udržuje napětí na R_4 .

Trimr P_4 slouží k nastavení zkreslení tvaru výstupního signálu a trimr P_5 k nastavení symetrie sinusového průběhu. Kombinací jejich nastavení lze docílit činitele harmonického zkreslení (THD) až 0,5 %. Zkreslení může být patrné na osciloskopu v podobě zákmitů v horních a dolních maximech sinusové vlny. Výrobce uvádí, že pro většinu aplikací tato skutečnost nevádí.

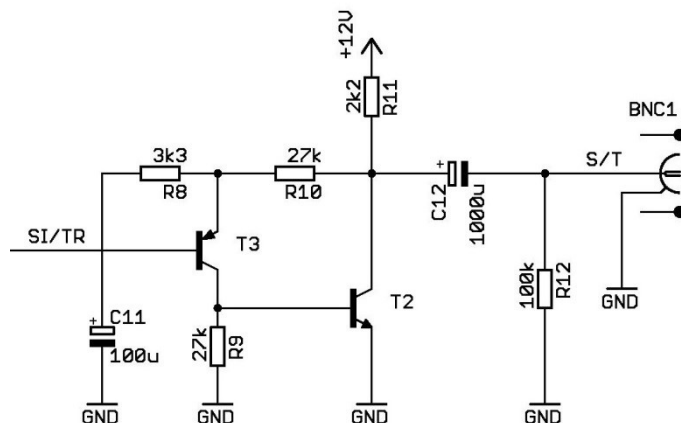
S velikostí amplitudy roste při vyšších frekvencích zkreslení signálu. Proto je velikost amplitudy signálu nastavena optimálně při frekvenci 10 kHz přibližně na 1,4 V u sinusového průběhu a 2,4 V u trojúhelníkového průběhu.

4.4 Úprava výstupů

Úprava výstupů sinusového, trojúhelníkového a obdélníkového signálu z vývodů 2 a 11 je provedena na základě schématu zapojení uvedeného v časopise Konstrukční elektronika A Radio (5/2009).

Na Obr. 15 je část schématu zapojení, která popisuje úpravu sinusového a trojúhelníkového signálu. Je tvořena dvoustupňovým přímovězaným zesilovačem s tranzistory T_2 a T_3 . Záporná zpětná vazba zaváděná z kolektoru T_2 přes rezistor R_{10} na emitor T_3 nastavuje pracovní bod. Stejnosměrný proud je vyloučen kondenzátorem C_{11} . Vlivem kondenzátoru C_{12} a vybíjecímu

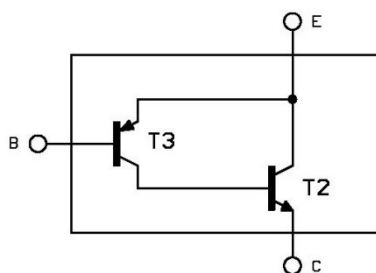
rezistoru R12 má signál jdoucí na konektor BNC1 nulovou stejnosměrnou složku. Napětíové zesílení určené děličem zpětné vazby tvořeným rezistory R10 a R8 je přibližně 9.



Obr. 15: Úprava sinusového a trojúhelníkového průběhu signálu.

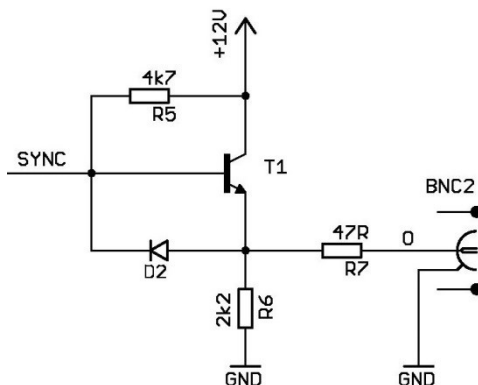
Zapojení dvojice tranzistorů T2 (NPN) a T3 (PNP) lze považovat za komplementární Darlingtonův tranzistor PNP. Toto pojetí je naznačeno na Obr. 16. E je označen emitor, B báze a C kolektor dvojice tranzistorů. Tranzistor T2 tak pracuje jako emitorový sledovač a zajišťuje proudové zesílení kolektorového proudu tranzistoru T3, přičemž nedochází ke změně fáze.

[13], [14]



Obr. 16: Komplementární Darlingtonův tranzistor PNP.

Na Obr. 17 je část schématu zapojení, která popisuje úpravu obdélníkového signálu. Je tvořena emitorovým sledovačem s tranzistorem T1. Rezistor R7 zajišťuje výstupní odpor 47 Ω . Mezi vývodem 11 (SYNC) IO2 a napájecím napětím je rezistor R5. Jedná se o pull-up rezistor, který je tak spojený s NPN tranzistorem uvnitř integrovaného obvodu XR-2206.



Obr. 17: Úprava obdélníkového průběhu signálu.

5 Návrh a realizace DPS pro navržený generátor signálu

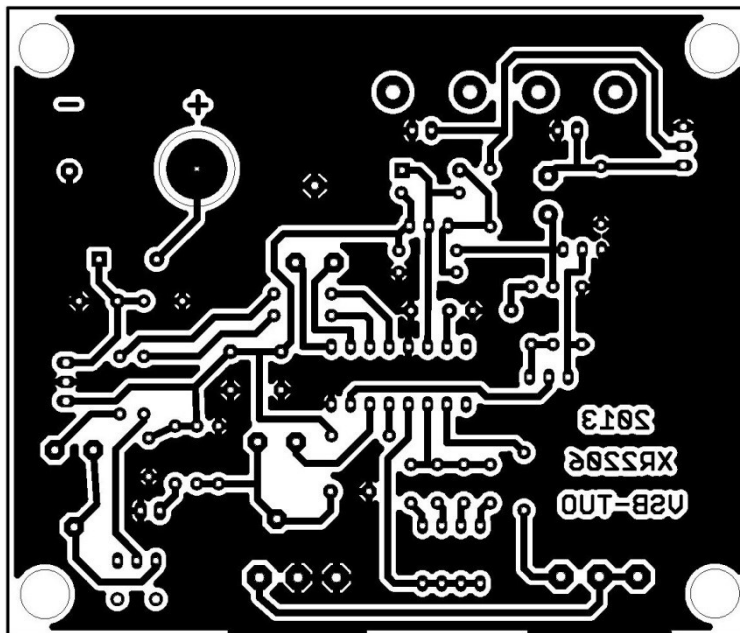
5.1 Návrh DPS

Návrh DPS byl proveden v programu Eagle. Rozměry DPS jsou 95 x 80 mm. Signálové cesty mají tloušťku 0,81 mm. Izolace mezi cestami a rozlitou zemí je 0,76 mm.

Pro umístění distančních sloupků o průměru 5 mm jsou v rozích DPS vyhrazené kruhové místa o průměru 10 mm. Jelikož jsou sloupky kovové, větší průměr zamezuje jejich dotyku s rozlitou zemí.

DPS je navržena tak, aby mohly být pro vstupní napájení použity zdířky určené primárně do panelu. Montážní otvory zdírek mají průměr 3 mm a jsou upevněny maticí s průměrem 5 mm. Zdířka pro záporný pól signálu je spojena přímo s rozlitou zemí. Plocha pro umístění zdířky, která je spojena s kladným pólem signálu, má kruhový tvar a průměr 8 mm proto, aby nedošlo k dotyku matice se zemí.

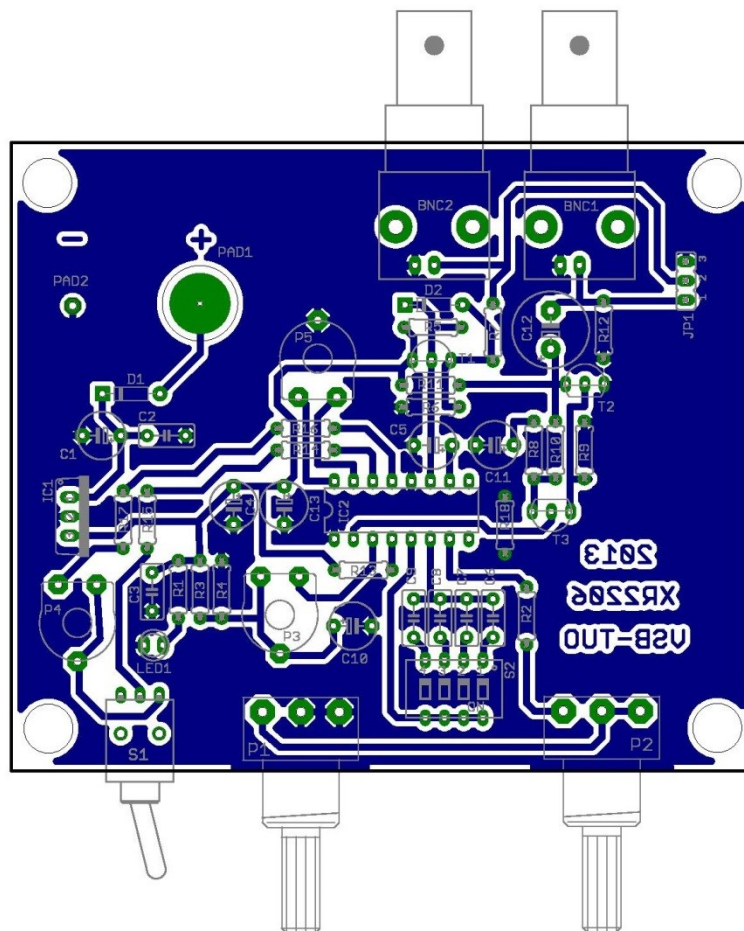
Pro snadnější identifikaci zařízení je na spodní straně DPS umístěn rok výroby 2013, název integrovaného obvodu XR-2206 a název školy VSB-TUO.



Obr. 18: Návrh DPS.

Na Obr. 18 je uvedena předloha, která byla použita pro výrobu desky plošných spojů. Na Obr. 19 je zobrazeno rozmístění součástek na DPS. Modře jsou vyznačeny cesty pro vedení signálu a rozlitá zem, zeleně pájecí plochy součástek a šedě obrysy součástek a jejich názvy.

Pro správnou funkci generátoru byl přidán rezistor s nulovou hodnotou odporu, který není zaznačen ve schématu na Obr. 12 a v návrhu DPS na Obr. 18. Při pohledu na svrchní stranu DPS je umístěn napříč mezi integrovaným obvodem XR-2206 a PNP tranzistorem T3. Slouží k propojení zemí na spodní straně DPS. Jeho umístění je vyznačeno na Obr. 19 rezistorem R18.



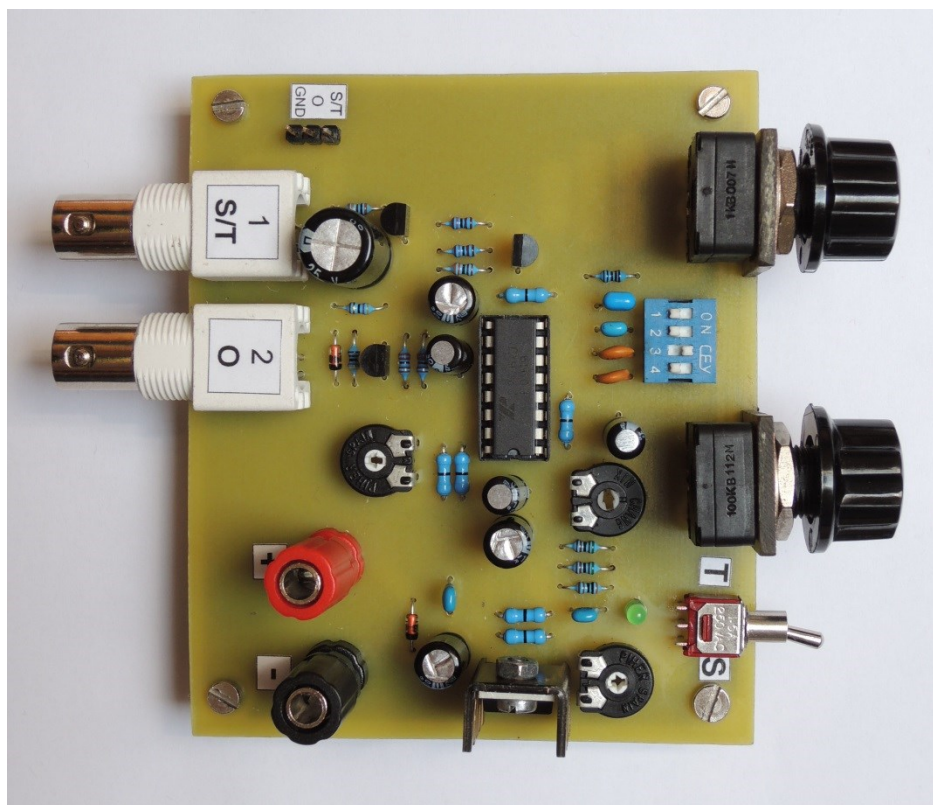
Obr. 19: Rozmístění součástek na desce generátoru signálů.

5.2 Realizace DPS a konstrukce generátoru signálu

Výroba DPS byla provedena fotocestou na desku s jednostrannými plošnými spoji. Návrh byl vytištěn laserovou tiskárnou na pauzovací papír, poté přední stranou obrácen na fotosenzitivní vrstvu cuprexitové desky a osvětlen UV světlem po dobu 5 minut. Následně byla deska dána do vývojky pro pozitivní fotoemulzi a do leptacího roztoku. Po vyleptání osvětlených ploch byla opět osvětlena UV světlem a dána do vývojky. Pilníkem byly dále upraveny hrany a vyvrtány montážní otvory. Deska byla poté očištěna ethanolem a v místech určených k pájení zalita pájecí kapalinou.

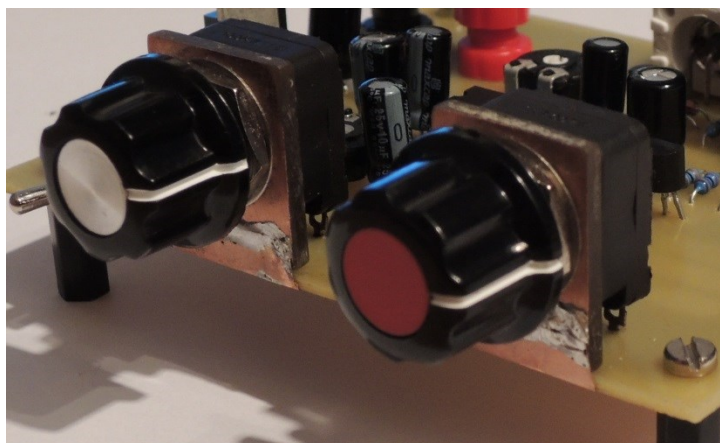
DPS byla osázena příslušnými součástkami s drátkovými vývody a standardní patičí s šestnácti vývody, pro umístění integrovaného obvodu XR-2206. Při osazování bylo postupováno od pasivních součástek. Jako první byla připevněna patice, rezistory a potenciometry, poté kondenzátory a následně polovodičové součástky (diody a tranzistory) a stabilizátor. Jako poslední součástka byl vložen integrovaný obvod XR-2206 do patice. Nakonec ke stabilizátoru připevněn pasivní chladič a v rozích desky byly upevněny kovové distanční sloupky.

Realizovaný generátor signálů je zobrazen na Obr. 20. Pro dobrou orientaci při práci bylo zařízení označeno štítky s popisem pinů kolíkové lišty (S/T, O, GND), BNC konektorů (S/T, O) a přepínače S1 mezi sinusovým a trojúhelníkovým průběhem.



Obr. 20: Realizovaný generátor signálů.

Jelikož potenciometry P1 a P2 obsahují pouze tři, k jejich stavbě poměrně tenké vývody, byly vybaveny pomocnou konstrukcí, která zajišťuje jejich stabilní přichycení k DPS. Jedná se o obdélníky z kuprexitové destičky, v nichž jsou vyřezány kruhové otvory pro potenciometr. Destičky jsou připojené pomocí tenkého měděného plechu ohnutého do pravého úhlu tak, aby zespod byly připájeny k DPS a z boku ke kuprexitovým destičkám. Detail přichycení potenciometrů je zobrazen na Obr. 21.



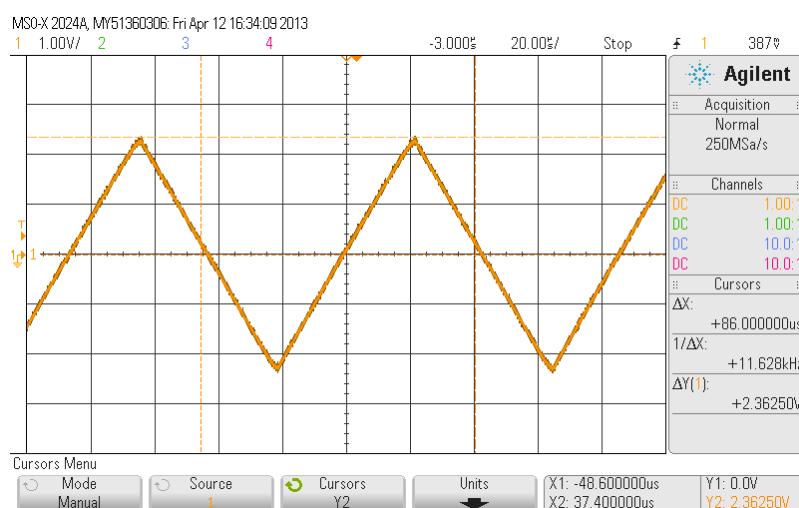
Obr. 21: Detail přichycení potenciometrů.

6 Oživení a testování realizovaného generátoru

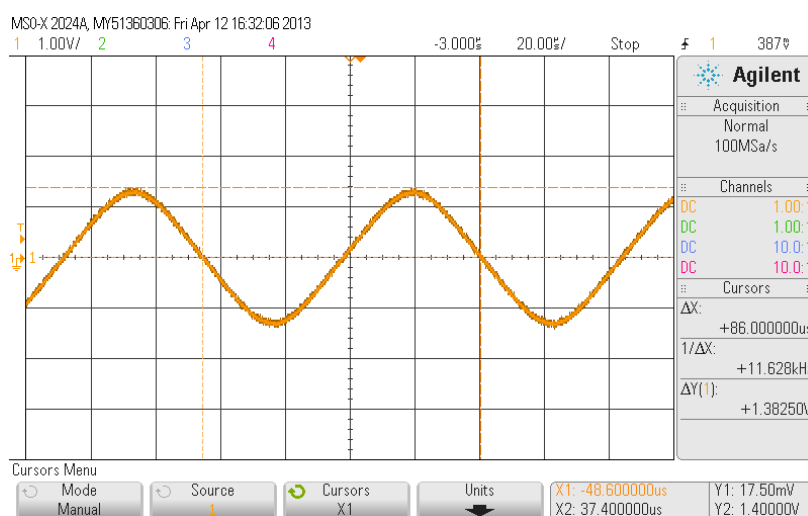
6.1 Oživení a nastavení tvaru výstupních průběhů signálů

Při ožívání bylo nejprve připojeno napájecí napětí a nastaveno omezení proudu na 0,02 A. Hodnota napětí byla postupně zvyšována za současné kontroly napětí 3. vývodu stabilizátoru oproti zemi. Při napájecím napětí 15 V, stabilizátor spolehlivě stabilizuje výstupní obvod na 12 V.

Pro nastavení ideálního tvaru trojúhelníkového a sinusového signálu byl na první kanál osciloskopu připojen konektor BNC1, zvolen 3. frekvenční rozsah a potenciometrem P1 byla nastavena frekvence 11,6 kHz. Kombinací trimrů P3 a P4 byla nastavena amplituda trojúhelníkového signálu a zkreslení jeho tvaru. Poté byl signál přepínačem S1 změněn na sinusový a nastavila se symetrie průběhu trimrem P5. Současně bylo kurzory na osciloskopu kontrolováno, zda kladné a záporné hodnoty mají stejnou absolutní hodnotu. Na Obr. 22 je uveden trojúhelníkový signál, jehož amplituda má hodnotu 2,36 V. Na Obr. 23 je uveden sinusový signál, jehož amplituda má při stejném nastavení hodnotu 1,38 V.

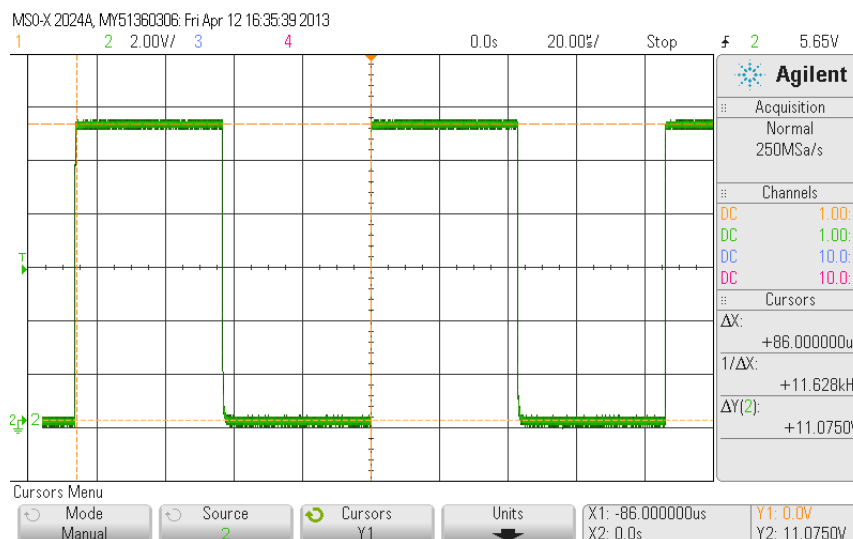


Obr. 22: Nastavení tvaru trojúhelníkového signálu.



Obr. 23: Nastavení tvaru sinusového signálu.

Na druhý kanál osciloskopu byl připojen konektor BNC2, jehož výstupem je obdélníkový signál. Tvar signálu se nijak nenastavoval. Z Obr. 24 lze vidět, že signál je stejnosměrný, s frekvencí 11,6 kHz a amplitudou 11 V.

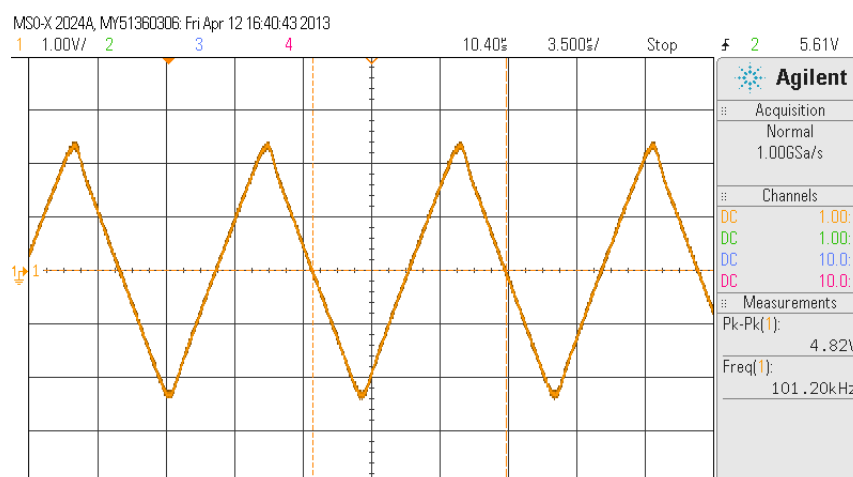


Obr. 24: Tvar obdélníkového signálu.

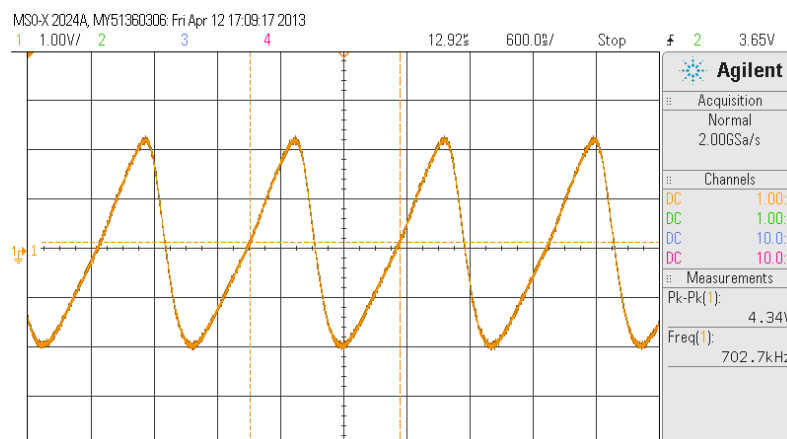
6.2 Testování generovaných průběhů

Generované průběhy byly zkontrolovány na osciloskopu na několika různých frekvencích v řádech Hz, kHz a MHz. Přibližně do hodnoty 200 kHz měly všechny signály tvar bez výrazných deformací. Se stoupající frekvencí se dále začalo projevovat zkreslení.

6.2.1 Trojúhelníkový průběh



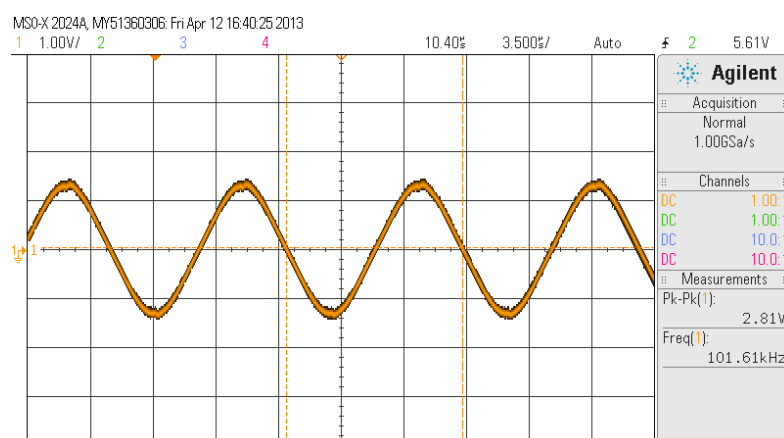
Obr. 25: Trojúhelníkový signál při frekvenci 101,2 kHz.



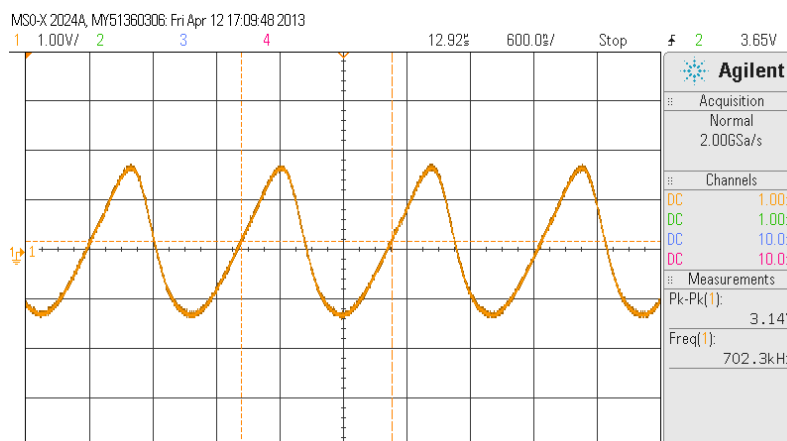
Obr. 26: Trojúhelníkový signál při frekvenci 702,7 kHz.

Generovaný trojúhelníkový signál se blíží nejvíce ideálnímu průběhu v rozsahu frekvencí do 200 kHz. V tomto rozsahu si také udržuje stálou amplitudu. Ze zaznamenaných průběhů je patrné, že se zvyšující se frekvencí dochází ke zkreslení tvaru. Současně dochází ke zmenšení amplitudy. Pro porovnání, při frekvenci 101,2 kHz je mezivrcholový rozkmit 4,82 V a při frekvenci 702,7 kHz je rozkmit 4,34 V.

6.2.2 Sinusový průběh



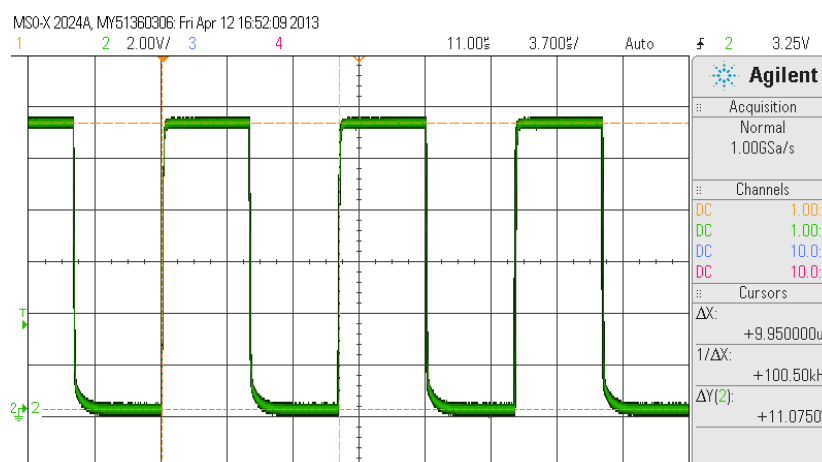
Obr. 27: Sinusový signál při frekvenci 101,61 kHz.



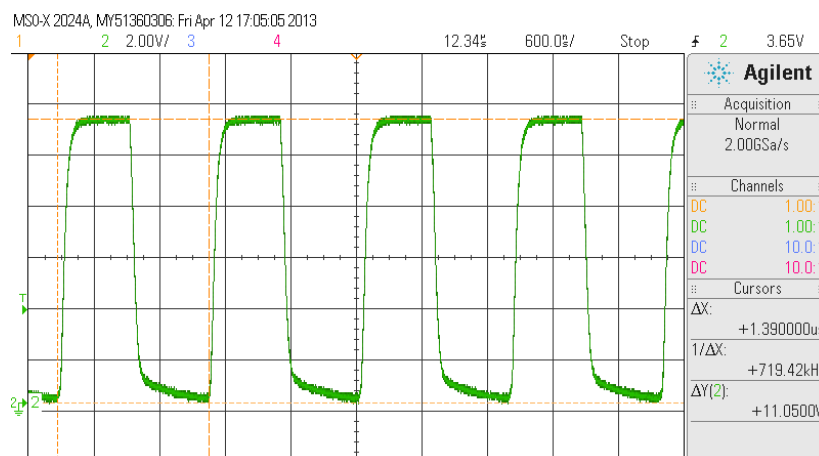
Obr. 28: Sinusový signál při frekvenci 702,3 kHz.

Generovaný sinusový signál se blíží nejvíce ideálnímu průběhu v rozsahu frekvencí do 400 kHz. Ze záznamů průběhů lze vidět, že se zvyšující se frekvencí dochází ke zkreslení tvaru. Současně dochází ke změně amplitudy, a to (na rozdíl od trojúhelníkového signálu) k jejímu zvýšení. Pro porovnání, při frekvenci 101,2 kHz je mezivrcholový rozkmit 2,81 V a při frekvenci 702,7 kHz je rozkmit 3,14 V.

6.2.3 Obdélníkový průběh



Obr. 29: Obdélníkový signál při frekvenci 100,5 kHz.



Obr. 30: Obdélníkový signál při frekvenci 719 kHz.

Generovaný obdélníkový signál se blíží nejvíce ideálnímu průběhu v rozsahu frekvencí do 200 kHz. Ze zaznamenaných průběhů je patrné, že se zvyšující se frekvencí dochází ke zkreslení tvaru v místech okolo náběžných hran signálu. Zvyšující se frekvence nemá vliv na amplitudu, která si udržuje stabilní hodnotu 11 V.

6.3 Frekvenční analýza

V ideálním případě se ve spektru sinusového průběhu objevuje pouze první harmonická složka a ostatní jsou nulové. Spektrum trojúhelníkového a obdélníkového obsahuje pouze liché harmonické složky a spektrum pilovitého průběhu zahrnuje všechny násobky základního kmitočtu.

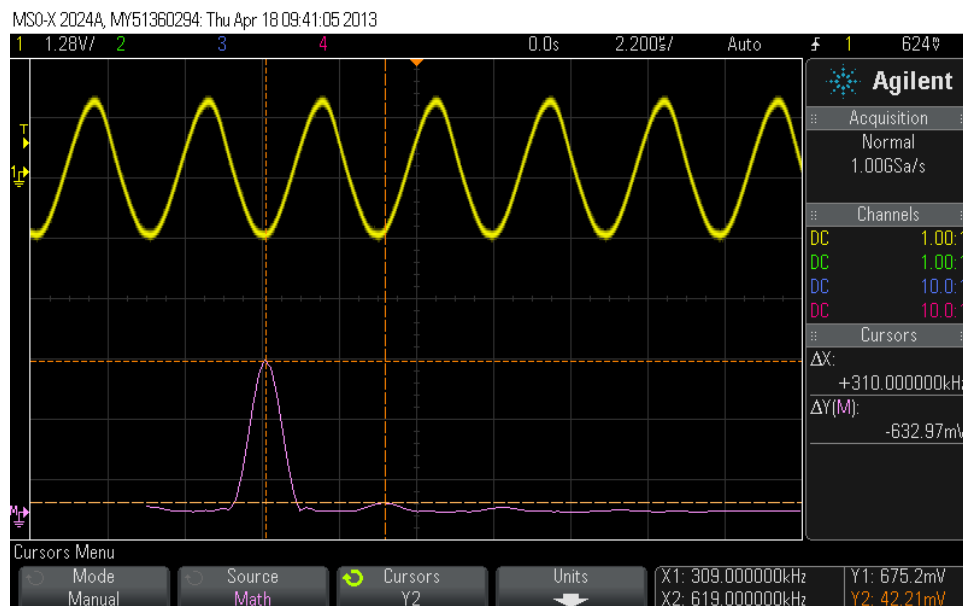
Generátor byl trimry nastaven tak, aby byl co možná nejideálnější sinusový průběh. Generovaný sinusový a obdélníkový signál se odvozují z trojúhelníkového signálu. Ten však není ideální, projevuje se u něj deformace a ve vysokých frekvencích se začíná blížit pilovitému signálu. Proto se v jednotlivých spektrech částečně objevují všechny harmonické složky.

Obsah frekvenčních složek u všech typů průběhu generovaných signálů byl zjišťován dvojím způsobem. V první řadě pomocí osciloskopu, na kterém byl analyzovaný signál zobrazen a zpracován prostřednictvím matematického FFT operátoru a následně byl tentýž signál připojen na vstup spektrálního analyzátoru.

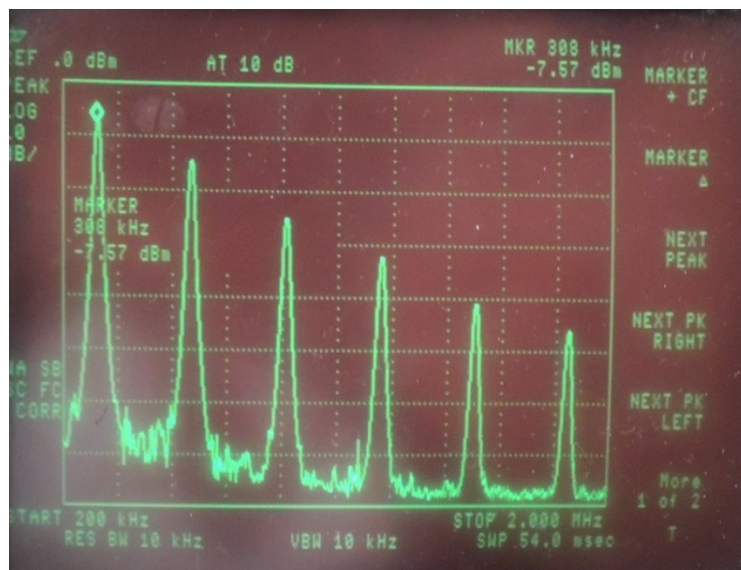
Na Obr. 31 až Obr. 36 jsou záznamy frekvenční analýzy signálů o frekvenci 309 kHz pro různé tvary průběhu. V Tab. 6 až Tab. 8 je přehled naměřených hodnot. Ve všech případech bylo nastavení rozsahu zobrazeného spektra na osciloskopu (centrální frekvence 700 kHz, rozpětí 2 MHz) a na spektrálním analyzátoru (200 kHz až 2 MHz) totožné.

6.3.1 Sinusový průběh

Z naměřených údajů v Tab. 6 lze vidět, že nejvyšší napětíovou a výkonovou úroveň má první frekvenční složka. Její frekvence se rovná přibližně frekvenci analyzovaného signálu. Úrovně této složky jsou 675,2 mV a -7,55 dBm. Rovněž je patrné, že se ve spektru nachází vyšší harmonické složky, které jsou přítomny vlivem způsobu generování signálu.



Obr. 31: FFT analýza sinusového signálu, $f = 309$ kHz.

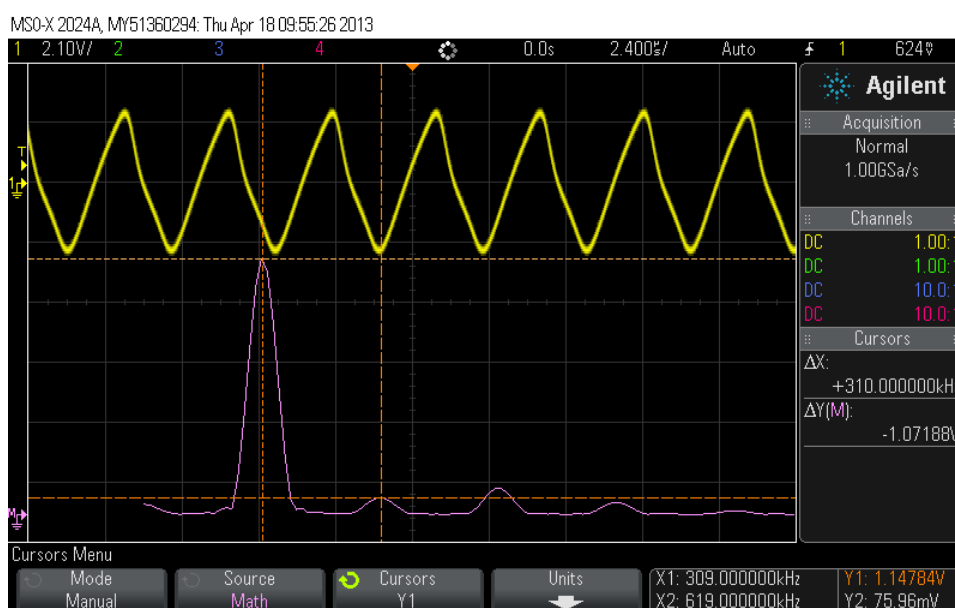


Obr. 32: Analýza spektrálním analyzátořem sinusového signálu, $f = 309$ kHz.

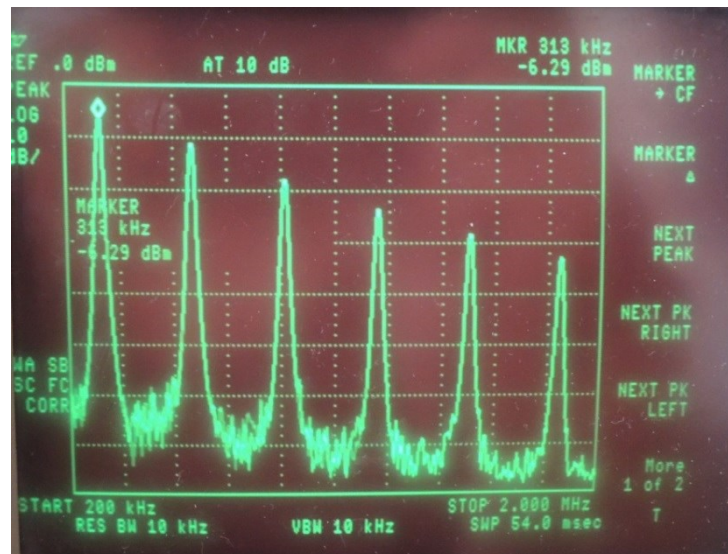
Tab. 6: Přehled naměřených údajů u sinusového signálu s frekvencí 309 kHz.

Pořadí harmonické složky		1.	2.	3.	4.	5.	6.
FFT analýza osciloskopem	Frekvence [kHz]	309	619	-	-	-	-
	Napětíová úroveň [mV]	675,2	42,21	-	-	-	-
Spektrální analyzátoř	Frekvence [kHz]	308	619	933	1244	1555	1861
	Výkonová úroveň [dBm]	-7,55	-14,66	-25,21	-32,57	-41,25	-46,97

6.3.2 Trojúhelníkový průběh



Obr. 33: FFT analýza trojúhelníkového signálu, $f = 309$ kHz.



Obr. 34: Analýza spektrálním analyzátozem trojúhelníkového signálu, $f = 309$ kHz.

Tab. 7: Přehled naměřených údajů u trojúhelníkového signálu s frekvencí 309 kHz.

Pořadí harmonické složky		1.	2.	3.	4.	5.	6.
FFT analýza osciloskopem	Frekvence [kHz]	309	619	924	1236	1541	-
	Napětíová úroveň [mV]	1148	75,96	118,2	59,08	15,65	-
Spektrální analyzátor	Frekvence [kHz]	313	619	924	1244	1555	1861
	Výkonová úroveň [dBm]	-6,26	-11,23	-18,02	-23,67	-28,24	-32,81

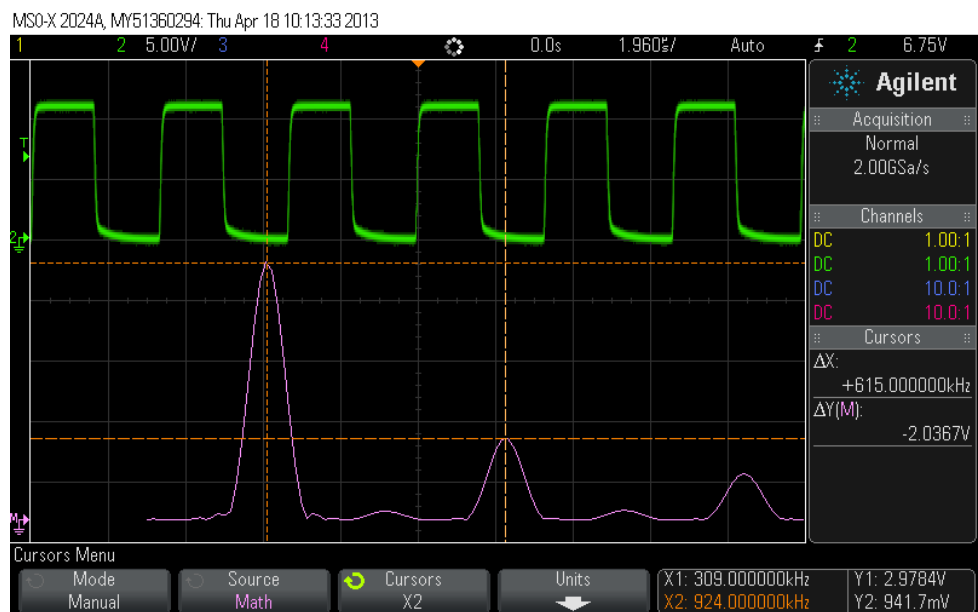
Z naměřených údajů v Tab. 7 lze vidět, že nejvyšší napětíovou a výkonovou úroveň má první frekvenční složka. Její frekvence se blíží frekvenci analyzovaného signálu. Úrovně této složky jsou 1 148 mV a -6,26 dBm.

Ve spektru jsou dále přítomny vyšší harmonické složky, jejichž frekvence je přibližně rovna celočíselnému násobku první frekvenční složky. Oproti ideálnímu trojúhelníkovému signálu, obsahuje měřený signál navíc sudé harmonické složky, které jsou dány vlivem způsobu generování signálu.

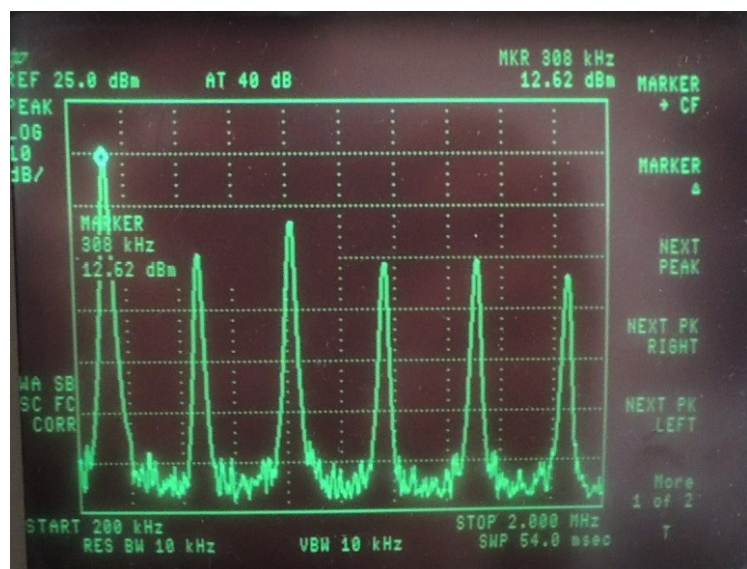
6.3.3 Obdélníkový průběh

Z naměřených údajů v Tab. 8 lze vidět, že nejvyšší napětíovou a výkonovou úroveň má první frekvenční složka. Její frekvence se blíží frekvenci analyzovaného signálu, tj. 309 kHz. Její úrovně jsou 2978 mV a 12,62 dBm. Ve spektru jsou dále přítomny vyšší harmonické složky, jejichž frekvence je přibližně rovna násobku první frekvenční složky.

U ideálního signálu se ve spektru obdélníkového průběhu vyskytují pouze liché harmonické složky. V tomto případě se vlivem způsobu generování signálu ve spektru vyskytují i složky sudé, avšak s poměrně nízkou napětíovou a výkonovou úrovní.



Obr. 35: FFT analýza obdélíkového signálu, $f = 309$ kHz.



Obr. 36: Analýza spektrálním analyzátozem obdélíkového signálu, $f = 309$ kHz.

Tab. 8: Přehled naměřených údajů u obdélíkového signálu s frekvencí 309 kHz.

Pořadí harmonické složky		1.	2.	3.	4.	5.	6.
FFT analýza osciloskopem	Frekvence [kHz]	308	619	924	1239	1545	-
	Napětíová úroveň [mV]	2978	109,5	941,7	131,4	547,5	-
Spektrální analyzátoz	Frekvence [kHz]	308	619	933	1244	1555	1861
	Výkonová úroveň [dBm]	12,62	-4,91	1,95	-6,08	-5,41	-9,13

7 Zhodnocení

Realizovaný generátor signálů dokáže generovat sinusový, trojúhelníkový a obdélníkový průběh v rozsahu frekvencí 10 Hz až 1,4 MHz. Při optimálním nastavení je amplituda sinusového signálu přibližně 1,4 V, trojúhelníkového 2,4 V a obdélníkového 11 V. Tyto parametry si signály udržují stabilně až do frekvence přibližně 200 kHz. Od této hodnoty se začíná se stoupající frekvencí pozvolna projevovat zkreslení.

Generátor byl navržen tak, aby docházelo k co nejmenšímu zkreslení sinusového průběhu. K tomuto přispívá i vhodná kombinace nastavení příslušnými trimry. Sinusový signál si zachovává ideální tvar i ve frekvencích nad 400 kHz. Oproti tomu se u trojúhelníkového signálu se stejným nastavením již projevuje zkreslení. Ve frekvencích nad 700 kHz se signály sobě začínají tvarově podobat. Rozpoznat je lze podle velikosti amplitudy. Tato podobnost je projevem vnitřní struktury integrovaného obvodu XR-2206, kdy jeden signál je odvozován z druhého pomocí tvarovacího obvodu.

Obdélníkový signál si zachovává optimální tvar přibližně do frekvence 200 kHz. Nad touto hranicí se ve větší míře začíná projevovat zkreslení v oblasti náběžných hran. Amplituda si udržuje stabilně hodnotu napětí 11 V v celém frekvenčním rozsahu.

Frekvenční spektra těchto signálů odpovídají teoretickým předpokladům. Frekvence první harmonické složky je rovna základní frekvenci analyzovaného signálu. Tato hodnota se rovněž přibližně shoduje se vzdáleností mezi jednotlivými složkami. Ve spektrech všech generovaných průběhů se částečně objevují všechny harmonické složky. To je dáno konstrukcí zařízení, kdy je sinusový a obdélníkový signál odvozován z trojúhelníkového.

Naměřené výsledky z testovací fáze realizace generátoru signálu jsou využity ve vytvořené laboratorní úloze, a to konkrétně ve vzorovém protokolu o měření. Laboratorní úloha pro měření se spektrálním analyzátozem je koncipována tak, aby studenti pochopili základní souvislosti mezi zobrazením signálu v časové a frekvenční oblasti a naučili se měřit spektrum nejen se spektrálním analyzátozem, založeným na heterodynním směšování signálů, ale také s použitím digitálního osciloskopu.

8 Závěr

Ve své bakalářské práci jsem se zabývala jednotlivými principy analýzy frekvenčního spektra s použitím spektrálního analyzátoru. Nabyté teoretické znalosti jsem následně využila i prakticky. Cílem práce bylo vytvořit laboratorní úlohu pro výuku měření se spektrálním analyzátozem. Pro tento účel jsem navrhla koncept generátoru signálů, který je v úloze použit.

Navržený generátor je analogový. Jeho ústřední částí je integrovaný obvod XR-2206, který při vhodném zapojení obvodových prvků již sám o sobě slouží jako funkční generátor vytvářející sinusový, trojúhelníkový a obdélníkový signál. Jednotlivé průběhy jsou odvozovány z trojúhelníkového signálu pomocí funkčních měničů.

Při návrhu obvodového schématu jsem vycházela ze zapojení doporučeného výrobcem integrovaného obvodu. Zaměřila jsem se na zapojení, jehož výsledkem je minimální zkreslení tvaru sinusového průběhu signálu. Toto zapojení jsem pozměnila pro jeho širší využití. Změna se týkala převážně částí souvisejících s velikostí frekvence generovaného signálu. Návrh zahrnuje 4 frekvenční rozsahy, které umožňují generovat frekvenci signálu nad 1 MHz a potenciometry, jimiž lze frekvenci plynule nastavovat. Nezbytnou součástí návrhu je také úprava vstupního napájení. Úprava výstupních signálů zahrnuje zesílení a impedanční přizpůsobení vzhledem k záměru připojení generátoru ke spektrálnímu analyzátoru.

Návrh DPS jsem provedla v programu Eagle tak, aby konstrukci bylo možné zhotovit na desku s jednostrannými plošnými spoji. Desku jsem vyrobila fotocestou a následně osadila příslušnými součástkami. Pro zlepšení stability konstrukce při manipulaci se zařízením jsem vyrobila speciální podpěry z kuprexitových destiček.

Testování realizovaného generátoru v první řadě spočívalo v zobrazení jednotlivých průběhů signálů na osciloskopu. Úskalí spočívalo v nastavení optimálního sinusového a trojúhelníkového signálu, neboť vzájemná kombinace nastavení amplitudy, zkreslení tvaru a symetrie signálu příslušnými trimry vede k různým změnám výstupního průběhu.

Generované signály jsem dále testovala s použitím spektrálního analyzátoru. Využila jsem digitálního osciloskopu s možností výpočtu FFT a spektrálního analyzátoru založeného na heterodyním směšování signálů s filtrací. Jednotlivá frekvenční spektra odpovídala teoretickým předpokladům.

Jako poslední část práce jsem vytvořila zadání laboratorní úlohy s realizovaným generátorem, včetně vzorového protokolu o měření. Tato úloha může být používána ve výukových předmětech souvisejících s elektrickým měřením.

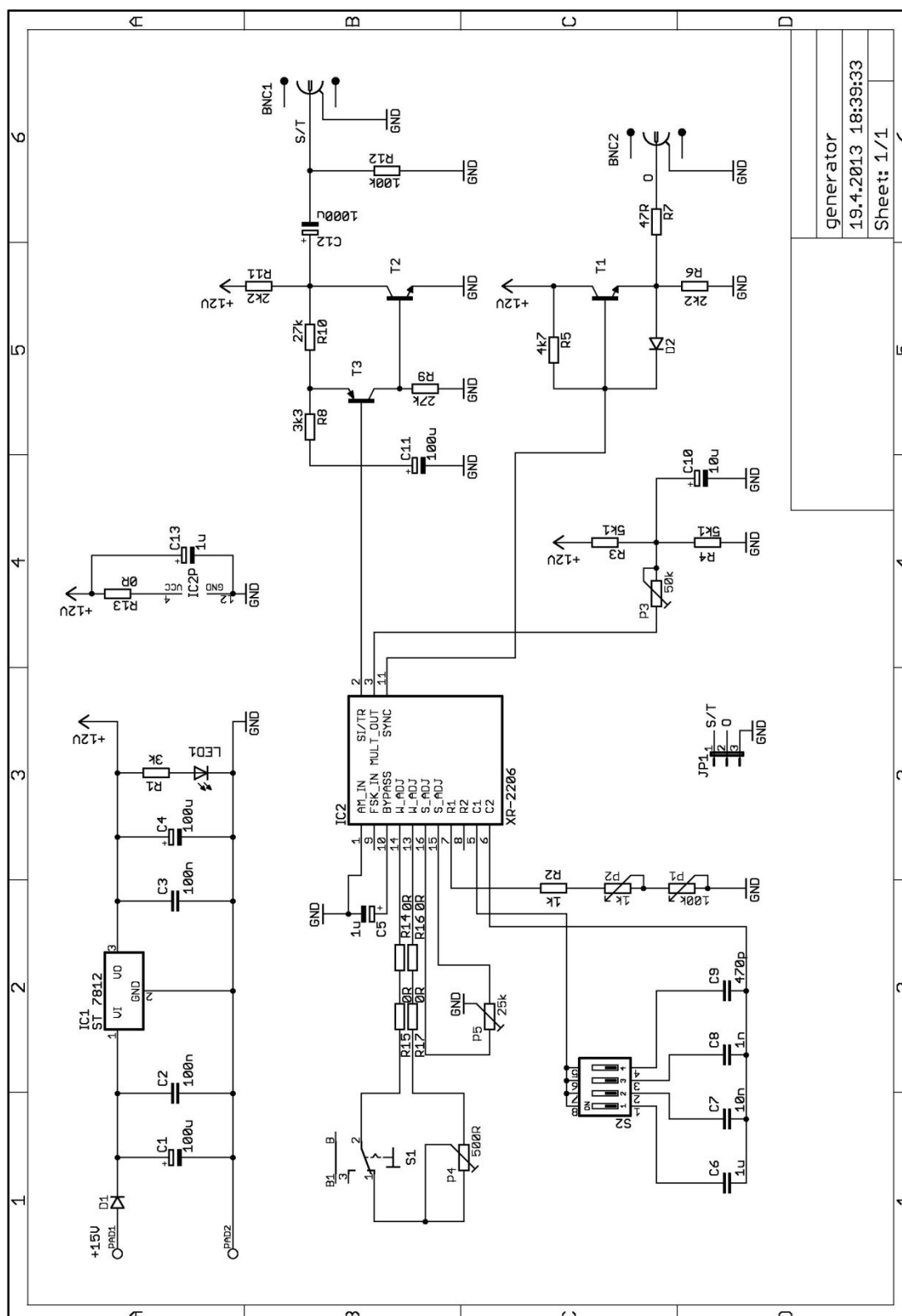
Integrovaný obvod XR-2206 má potenciál být využit i v jiných aplikacích. Možným rozšířením může být využití dalších výstupů z obvodu pro amplitudovou nebo frekvenční modulaci signálu.

Na závěr bych chtěla dodat, že jsem splnila všechny body zadání mé bakalářské práce. Důkazem tohoto tvrzení je funkční generátor signálů a vypracovaná laboratorní úloha včetně návodu do cvičení.

Použitá literatura

- [1] NEVŘIVA, Pavel. *Analýza signálů a soustav*. 1. vyd. Praha: BEN, 2000. 671 s. ISBN 80-7300-004-0.
- [2] NEVŘIVA, Pavel – PIEŠ, Martin. *Signály a soustavy: učební text a návody do cvičení*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012. 293 s.
- [3] ČSN 33 0010. *Elektrotechnické předpisy. Elektrická zařízení. Rozdělení a pojmy*. 1984-03-01.
- [4] XR-2206. *Monolithic Function Generator*. Fremont: EXAR Corporation, 1997. 16 s. Dostupné z URL <www.datasheetcatalog.com>.
- [5] ZAPLATÍLEK, Karel – DOŇAR, Bohuslav. *Matlab – začínáme se signály*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. 272 s. ISBN 80-7300-200-0.
- [6] NEVŘIVA, Pavel. *Základy teorie signálů a soustav pro obor biomedicínská technika*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 110 s. ISBN 978-80-248-1344-8.
- [7] MACHÁČEK, Zdeněk. *Základy teorie signálů a soustav pro obor biomedicínská technika. Cvičení*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 95 s. ISBN 978-80-248-1424-7.
- [8] *Rychlá Fourierova transformace (FFT) pro AVR* [ONLINE]. [cit. 2012-12-18]: Dostupné z URL <<http://elektronika.kvalitne.cz/ATMEL/necoteorie/transformation/AVRFFT/AVRFFT.html>>
- [9] BARTUŠEK, Karel et al. *Měření v elektrotechnice*. 2. vyd. Brno: VUTUM, 2010. 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [10] HAASZ, Vladimír – SEDLÁČEK, Miloš. *Elektrická měření: Přístroje a metody*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2003. 337 s. ISBN 80-01-02731-7.
- [11] HOREVAJ, Michal – MATĚJKA, Štěpán. *Vysokofrekvenční měření*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2002. 166 s. ISBN 80-01-02477-6.
- [12] SROVNAL, Vilém et al. *Elektrotechnická měření. Měřicí přístroje pro SPŠ elektrotechnické*. 1. vyd. Praha: INFORMATORIUM, 2008. 140 s. ISBN 978-80-7333-062-0.
- [13] FROHN, Manfred et al. *Elektronika. Polovodičové součástky a základní zapojení*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. 480 s. ISBN 80-7300-123-3.
- [14] STACH, Jan. *Výkonové zesilovače v nízkofrekvenčních obvodech* [ONLINE]. [CIT. 2013-4-20] 1. vyd. Praha: SNTL, 1979. 400 s. Dostupné z URL <http://amapro.cz/datove_zdroje/knihy/_elektronika/vykonove_tranzistory/obsah_tranzistory.php>
- [15] *Generátor funkcí 2 s XR2206. Konstrukční elektronika A Radio*. Praha: Amaro, s.r.o, 2009, XIV, č. 5, s. 23. ISSN 1211-3557.
- [16] *User's Guide. 8590 E-Series and L-Series Spectrum Analyzers*. USA: Hewlett-Packard Company, 1998. 371 s. Manual Part Number 08590-90301.

Příloha A – Návrh obvodového řešení



generator
19.4.2013 18:39:33
Sheet: 1/1

Příloha B – Seznam použitých součástek

Rezistory		
<i>Hodnota</i>	<i>Počet</i>	<i>Označení</i>
3 kΩ	1	R1
3,3 Ω	1	R8
27 kΩ	2	R9, R10
2,2 kΩ	1	R6
100 kΩ	1	R12
5,1 kΩ	2	R3, R4
4,7 kΩ	1	R5
47 Ω	1	R7
1 Ω	1	R2
0 Ω	6	R13, R14, R15, R16, R17, R18,

Kondenzátory keramické		
<i>Hodnota</i>	<i>Počet</i>	<i>Označení</i>
1 μF	1	C6
10 nF	1	C7
1 nF	1	C8
470 pF	1	C9
100 nF	2	C2, C3

Ostatní		
<i>Název</i>	<i>Počet</i>	<i>Označení</i>
BC337 - tranzistor NPN	2	T1, T2
BC327 – tranzistor PNP	1	T3
1N4148 - dioda	2	D1, D2
LED dioda - zelená	1	LED1
XR-2206CP	1	IC2
ST7812 - stabilizátor	1	IC1
Páčkový spínač – 2 póly	1	S1
DIP spínač – 4 póly	1	S2
BNC konektor	2	BNC1, BNC2
Kolíková lišta – 3 piny	1	JP1
Zdířka - červená	1	PAD1
Zdířka - černá	1	PAD2
Chladič stabilizátoru	1	-
Distanční sloupky	4	-
Patice DIL - 16 pinů	1	-

Kondenzátory elektrolytické		
<i>Hodnota</i>	<i>Počet</i>	<i>Označení</i>
100 μF	3	C1, C4, C11
1000 μF	1	C2
10 μF	1	C10
1 μF	2	C5, C13

Potenciometry		
<i>Hodnota</i>	<i>Počet</i>	<i>Označení</i>
1 kΩ	1	P2
100 kΩ	1	P1

Trimry		
<i>Hodnota</i>	<i>Počet</i>	<i>Označení</i>
50 kΩ	1	P3
25 kΩ	1	P5
500 Ω	1	P4

Příloha C – Laboratorní úloha

1 Měření spektra vf signálu spektrálním analyzátozem

1.1 Cíl úlohy

Prostřednictvím této laboratorní úlohy se naučíte:

- měřit frekvenční spektrum signálů spektrálním analyzátozem
- měřit frekvenční spektrum signálů pomocí osciloskopu FFT výpočtem
- chápat souvislost mezi pořadím harmonické složky spektra signálu a jeho frekvencí
- chápat rozdíly v zobrazení spektra v závislosti na zvolených jednotkách

1.2 Zadání

1. Změřte intenzitu rádiového signálu rozhlasových stanic v pásmu FM od 80 do 110 MHz.
2. Změřte frekvenční spektrum zvoleného vf signálu tvaru sinus, obdélník a trojúhelník FFT analýzou pomocí osciloskopu a spektrálním analyzátozem.
3. Naměřené výsledky z 2. bodu zadání zpracujte do tabulky.

1.3 Předpokládané znalosti

Pro tuto úlohu se vyžaduje nastudování:

- 6. Osciloskopy a spektrální analyzátory v [1]
- 3. Analýza signálů se spojitým časem v kmitočtové oblasti v [2]

Zaměřte svoji pozornost na následující témata:

- vzájemná souvislost mezi signálem v časové oblasti a jeho spektrem
- vzájemná souvislost mezi jednotkami, ve kterých lze měřit úroveň amplitudy spektrálních složek měřeného signálu

1.4 Použité vybavení

- Spektrální analyzátor HP 8590L, sériové číslo: 3443U00172
- Osciloskop Agilent Technologies MSO-X 2024A , sériové číslo: MY51360294
- Laboratorní zdroj Matrix MPS-3005L-3, sériové číslo: D003025W
- Prutová teleskopická anténa
- Generátor signálů s XR-2206

1.5 Teoretický rozbor

Každý periodický signál lze rozložit na součet konstantního a harmonických (sinusových) signálů. Soubor těchto tzv. harmonických složek tvoří jeho frekvenční spektrum. Každá složka spektra představuje jeden harmonický signál a jejich vzdálenost

ve spektru je rovna základní frekvenci analyzovaného signálu.

Spektrální analyzátory jsou přístroje, které dokážou určit frekvence obsažené ve vstupním signálu. Podle způsobu zpracování signálu je lze rozdělit na analogové, které jsou založené na heterodynním směšování signálů s filtrací, a digitální, které spektrum získávají prostřednictvím matematického výpočtu Fourierovy transformace pomocí algoritmu FFT.

Frekvence vf signálů je měřena v jednotkách kHz, MHz, GHz. Amplituda může být měřena nejen v jednotkách napětí V, ale také jako výkonová úroveň v jednotkách dBm, což je výkonová úroveň signálu měřená v decibelech dB vyjádřených vzhledem k 1 mW, přičemž výkon je vztažen ke jmenovité hodnotě vstupní impedance analyzátoru (obvykle 50 Ω).

1.6 Pracovní postup

1.6.1 Postup k bodu č. 1 zadání

1. Zapněte spektrální analyzátor.
2. Ke vstupu INPUT 50 Ω připojte koaxiálním kabelem teleskopickou anténu.
3. Nastavte rozpětí měřených frekvencí 80 až 110 MHz:
 - Tlačítko FREQUENCY \rightarrow položka menu na pravé straně obrazovky START FREQ \rightarrow zadání počáteční hodnoty zobrazeného rozsahu 80 numerickou klávesnicí \rightarrow volba jednotek MHz.
 - FREQUENCY \rightarrow STOP FREQ \rightarrow zadání koncové hodnoty zobrazeného rozsahu 110 \rightarrow MHz.
4. Nastavte jednotky měřené amplitudy:
 - Tlačítku AMPLITUDE \rightarrow UNITS \rightarrow dBm.
5. Najděte vrcholy frekvenčního spektra:
 - Tlačítko MARKER \rightarrow tlačítko PEAK SEARCH \rightarrow mezi vrcholy se lze pohybovat otočným knoflíkem nebo volbami NEXT PEAK, NEXT PK RIGHT, NEXT PK LEFT.
6. Odečtěte hodnotu frekvence a úrovně signálu jednotlivých vrcholů spektra a přehledně zpracujte do tabulky. V rámci následného vypracování protokolu vyhledejte na internetu přesnou hodnotu změřené frekvence, název stanice a vysílače a údaje запиšte do stejné tabulky.

Tab. 1: Přehled rádiových signálů rozhlasových stanic.

Naměřená frekvence [MHz]	Skutečná frekvence [MHz]	Úroveň signálu [dBm]	Název rádia	Vysílač
91,01	91,00	-68,08	Frekvence 1	Hošťálkovice
...
...

7. Poříd'te záznam zobrazených rádiových signálů rozhlasových stanic.

1.6.2 Postup k bodu č. 2 zadání

1. Zapojte měřicí řetězec:
 - Zapněte laboratorní zdroj, nastavte napětí (VOLTAGE) na 15 V a omezení proudu (CURRENT) na 0,02 A
 - Zápornou zdířku zdroje propojte s GND
 - Připojte generátor signálů k napětí
 - Koaxiálním kabelem propojte výstup 1 (S/T) generátoru signálů s osciloskopem
2. Na osciloskopu nastavte útlum sondy na 1:1
 - Tlačítko čísla kanálu → PROBE → 1:1
3. Zobrazte průběh signálu, jeho frekvenci a amplitudu:
 - Zobrazte průběh tlačítkem Auto Scale
 - Tlačítko Meas → z nabídky vyberte Freq → Add Measurement
 - Tlačítko Meas → z nabídky vyberte Pk-Pk → Add Measurement
4. Na generátoru signálů nastavte přepínačem sinusový signál (S) a potenciometrem nastavte hodnotu ωf signálu – např. 300 kHz.
5. Pomocí funkce osciloskopu Math vypočítejte FFT:
 - Tlačítko Math → Operator → FFT
 - Unitst → RMS
 - Central → 700 kHz
 - Span → 2 MHz
6. Pomocí kurzorů změřte frekvenci a úroveň signálu jednotlivých složek spektra.
 - Tlačítko Cursors → Source → FFT
 - Kurzory X1, X2, Y1, Y2 nastavte do vrcholů a poznamenejte si hodnoty
7. Výsledek měření si uložte na USB disk.
 - Tlačítko Save → volba Save → Format např. PNG → Press to Save
8. Přepojte koaxiální kabel z osciloskopu na INPUT 50 Ω spektrálního analyzátoru.
9. Nastavte rozpětí zobrazených frekvencí na 200 kHz až 2 MHz obdobně jako v 1. bodu zadání.
10. Pomocí funkce PEAK SEARCH odečtěte hodnoty frekvencí a úrovně signálů jednotlivých složek spektra. Výsledky si poznamenejte.
11. Poříd'te záznam obrazovky se zobrazeným spektrem.
12. Přepojte koaxiální kabel z analyzátoru zpět na osciloskop.
13. Frekvenci signálu neměňte, pouze přepínačem na generátoru signálů změřte průběh na trojúhelníkový (T).
14. Opakujte body 3 až 11.
15. Koaxiálním kabelem propojte výstup 2 (O) generátoru signálů s osciloskopem.
16. Frekvenci signálu ponechejte stále stejnou a opakujte body 3 až 11.

1.6.3 Postup k bodu č. 3 zadání

Výsledky z 2. bodu zadání zpracujte do třech tabulek, zvlášť pro každý tvar průběhu analyzovaného signálu. Jako vzor k vypracování použijte níže uvedenou tabulku Tab. 2.

Tab. 2: Naměřené hodnoty spektra obdélníkového signálu s frekvencí 300 kHz.

Pořadí harmonické složky		1.	2.	3.	4.	5.	6.
FFT analýza osciloskopem	Frekvence	3					
	[kHz]	08	...	...	...	...	...
	Napěťová	2					
	úroveň [mV]	978	...	...	...	...	...
Spektrální analyzátor	Frekvence	3					
	[kHz]	08	...	...	...	...	...
	Výkonová	1					
	úroveň [dBm]	2,62	...	...	...	...	...

1.7 Výsledky

Ve výsledcích laboratorní úlohy uveďte:

- Záznam zobrazených rádiových signálů rozhlasových stanic
- Tabulku s naměřenými údaji rádiových signálů rozhlasových stanic
- Tři záznamy FFT analýzy z osciloskopu (pro sinusový, trojúhelníkový a obdélníkový průběh signálu o stejné frekvenci)
- Tři záznamy spektra zobrazeného pomocí spektrálního analyzátoru (pro sinusový, trojúhelníkový a obdélníkový průběh signálu o stejné frekvenci)
- Tři tabulky s hodnotami naměřenými pomocí osciloskopu a spektrálního analyzátoru

1.8 Kontrolní otázky

1. Hodnota frekvence analyzovaných signálů v 2. bodě zadání je: ____ kHz.
2. Je hodnota 1. harmonické složky analyzovaných signálů shodná u všech tvarů analyzovaných signálů? Odpověď zdůvodněte.
3. Jaký je vztah mezi frekvencí jednotlivých harmonických složek a jejich pořadím? Uveďte příklad z měření.
4. Jaký je rozdíl mezi jednotkami, v nichž je úroveň amplitudy měřená spektrálním analyzátozem a vypočítaná osciloskopem (dBm, V)?

1.9 Literatura

- [1] BARTUŠEK, Karel et al. *Měření v elektrotechnice*. 2. vyd. Brno: VUTUM, 2010. 212 s. ISBN 978-80-214-4160-6.
- [2] NEVŘIVA, Pavel – PIEŠ, Martin. *Signály a soustavy: učební text a návody do cvičení*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2012. 293 s.

Příloha D – Vzorový protokol

VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Protokol o měření

Měření spektra vf signálu spektrálním analyzátozem

Jan Novák, NOV555
Jakub Novotný, NOV556

18. 9. 2008

1.1 Použité vybavení

- Spektrální analyzátor HP 8590L, sériové číslo: 3443U00172
- Osciloskop Agilent Technologies MSO-X 2024A , sériové číslo: MY51360294
- Laboratorní zdroj Matrix MPS-3005L-3, sériové číslo: D003025W
- Prutová teleskopická anténa
- Generátor signálů s XR-2206

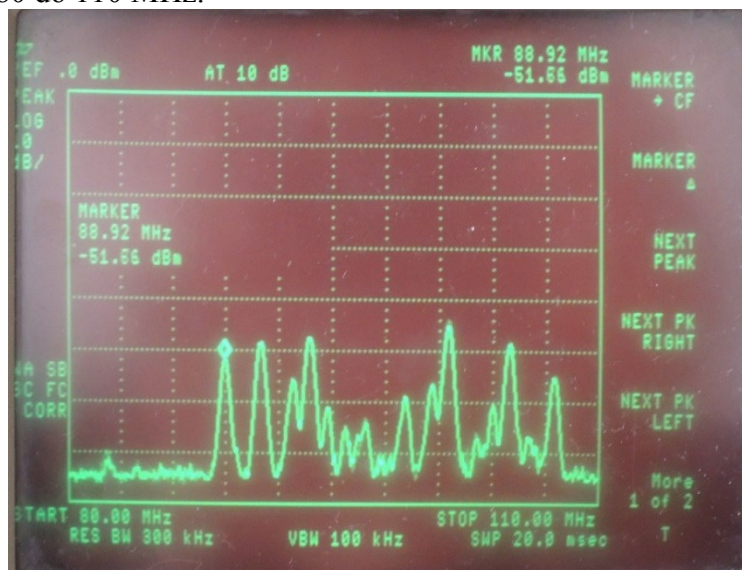
1.2 Popis měření

- V rámci vypracování 1. bodu zadání jsme ke vstupu spektrálního analyzátoru připojili teleskopickou anténu. Na analyzátoru jsme nastavili rozpětí měřených frekvencí 80 až 110 MHz a zjistili hodnotu frekvence a intenzity jednotlivých vrcholů spektra.
- Pro měření 2. bodu zadání jsme na generátor signálů přivedli napětí 15 V a propojili výstup 1 (S/T) s osciloskopem, na němž jsme zobrazili sinusový průběh signálu s frekvencí 309 kHz a mezivrcholovým rozkmitem přibližně 3 V. Pomocí funkce osciloskopu Math jsme vypočítali FFT a kurzory změřili frekvenci a úroveň signálu jednotlivých složek spektra. Následně jsme generátor signálů přepojili na vstup spektrálního analyzátoru, nastavili rozpětí zobrazených frekvencí na 200 kHz až 2 MHz a zjistili hodnotu frekvence a intenzity jednotlivých vrcholů spektra.
- Měření jsme stejným způsobem opakovali se signálem s trojúhelníkovým průběhem o frekvenci 309 kHz a mezivrcholovým rozkmitem přibližně 5 V a se signálem s obdélníkovým průběhem o frekvenci 309 kHz a amplitudou 11 V. Naměřené výsledky jsme nakonec zpracovali do tabulek.

1.3 Výsledky měření

1.3.1 K bodu zadání 1

Zadáním tohoto bodu bylo změřit intenzitu rádiového signálu rozhlasových stanic v pásmu FM od 80 do 110 MHz.



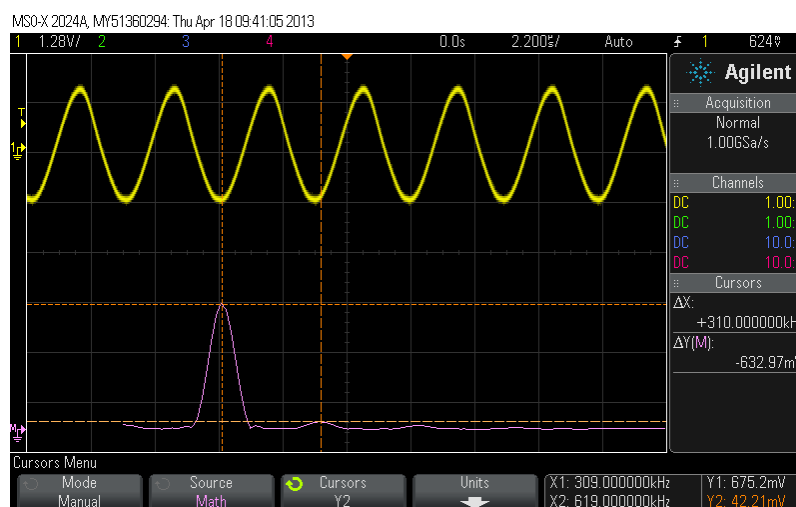
Obr. 1: Měření intenzity rádiového signálu rozhlasových stanic.

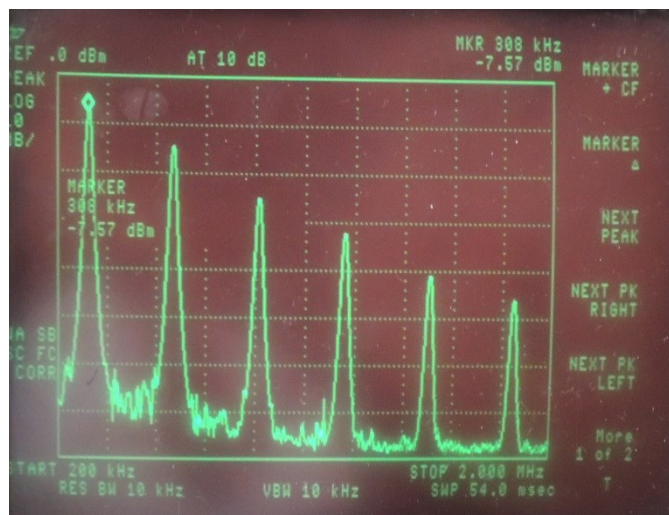
Tab. 1: Přehled rádiových signálů rozhlasových stanic.

Naměřená frekvence [MHz]	Skutečná frekvence [MHz]	Úroveň signálu [dBm]	Název rádia	Vysílač
88,92	89,0	-51,66	Rádio Impuls	Hošťálkovice
90,95	91,0	-50,23	Frekvence 1	Hošťálkovice
92,82	92,8	-55,82	Radio Čas	Dobroslavice
93,72	93,7	-46,73	Helax	Hošťálkovice
94,77	94,7	-64,15	Radio Hey!	Dobroslavice
95,67	95,9	-68,21	Radio Čas	Bruntál
96,87	96,8	-68,56	ČRo 2	Radhošť
99,05	99,0	-62,54	ČRo 5 Ostrava	Radhošť
100,55	100,5	-57,14	Rádio Impuls	Radhošť
101,45	101,4	-44,18	ČRo 1 - Radiožurnál	Hošťálkovice
104,08	103,9	-61,32	Hitrádio Orion	Radhošť
104,90	104,8	-50,21	ČRo 3 - Vltava	Hošťálkovice
107,45	107,3	-55,48	ČRo 5 Ostrava	Hošťálkovice

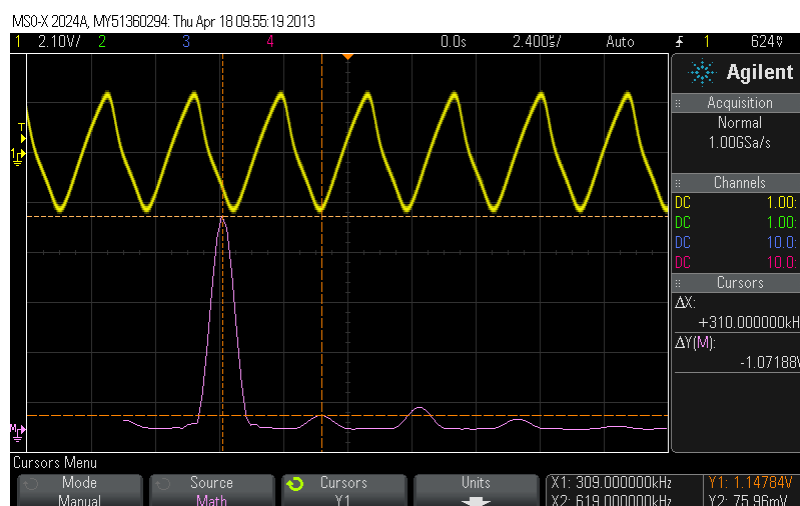
1.3.2 K bodu zadání 2

Zadáním tohoto bodu bylo změřit frekvenční spektrum zvoleného vf signálu tvaru sinus, obdélník a trojúhelník FFT analýzou pomocí osciloskopu a spektrálním analyzátořem.

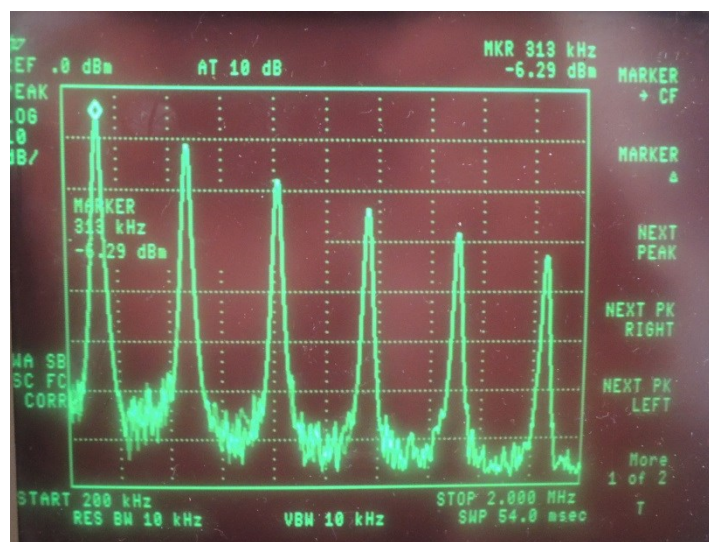
**Obr. 2: FFT analýza sinusového signálu s frekvencí 309 kHz.**



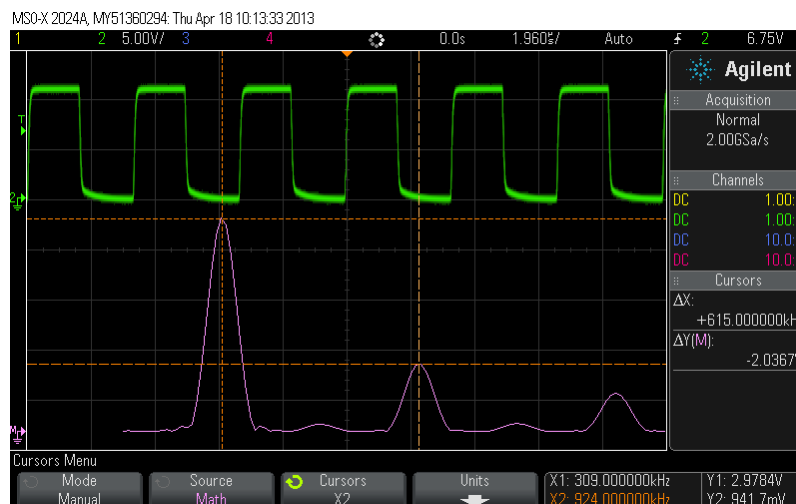
Obr. 3: Analýza spektrálním analyzátozem sinusového signálu.



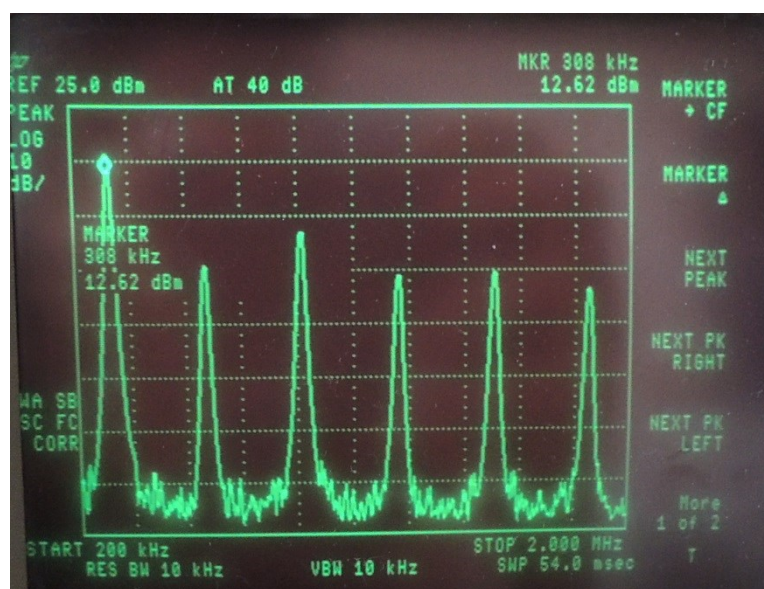
Obr. 4: FFT analýza trojúhelníkového signálu s frekvencí 309 kHz.



Obr. 5: Analýza spektrálním analyzátozem trojúhelníkového signálu.



Obr. 6: FFT analýza obdélkového signálu s frekvencí 309 kHz.



Obr. 7: Analýza spektrálním analyzátozem obdélkového signálu.

1.3.3 K bodu zadání 2

Zadáním tohoto bodu bylo zpracovat výsledky z 2. bodu zadání do tabulky.

Tab. 2: Přehled naměřených údajů u sinusového signálu.

Pořadí harmonické složky	1.	2.	3.	4.	5.	6.
FFT analýza osciloskopem	Frekvence [kHz]	309	619	-	-	-
	Napěťová úroveň [mV]	675,2	42,21	-	-	-
Spektrální analyzátor	Frekvence [kHz]	308	619	933	1244	1555
	Výkonová úroveň [dBm]	-7,55	-14,66	-25,21	-32,57	-41,25
					-46,97	

Tab. 3: Přehled naměřených údajů u trojúhelníkového signálu.

Pořadí harmonické složky		1.	2.	3.	4.	5.	6.
FFT analýza osciloskopem	Frekvence [kHz]	309	619	924	1236	1541	-
	Napět'ová úroveň [mV]	1148	75,96	118,2	59,08	15,65	-
Spektrální analyzátor	Frekvence [kHz]	313	619	924	1244	1555	1861
	Výkonová úroveň [dBm]	-6,26	-11,23	-18,02	-23,67	-28,24	-32,81

Tab. 4: Přehled naměřených údajů u obdélníkového signálu.

Pořadí harmonické složky		1.	2.	3.	4.	5.	6.
FFT analýza osciloskopem	Frekvence [kHz]	308	619	924	1239	1545	-
	Napět'ová úroveň [mV]	2978	109,5	941,7	131,4	547,5	-
Spektrální analyzátor	Frekvence [kHz]	308	619	933	1244	1555	1861
	Výkonová úroveň [dBm]	12,62	-4,91	1,95	-6,08	-5,41	-9,13

1.4 Odpovědi na otázky

- Hodnota frekvence analyzovaných signálů v 2. bodě zadání je: 309 kHz.
- Hodnota 1. harmonické složky je rovna základní frekvenci analyzovaného signálu. Analyzovaný signál měl stejnou frekvenci u sinusového, trojúhelníkového i obdélníkového signálu. Proto se frekvence 1. harmonické složky ve všech případech rovná přibližně 309 kHz.
- Vzdálenost mezi jednotlivými složkami je rovna základní frekvenci analyzovaného signálu. Platí vztah:

$$f_m = m \cdot f_0 \quad (1)$$

kde:

f_0 [Hz]základní frekvence analyzovaného signálu,

f_m [Hz]frekvence m-té harmonické složky,

m [-]pořadí harmonické složky.

Příklad z měření:

Základní frekvence obdélníkového signálu měřeného spektrálním analyzátozem je 309 kHz. Frekvence jeho 2. harmonické složky je 619 kHz. Po dosazení do výše uvedeného vztahu dostáváme:

$$f_m = m \cdot f_0 = 2 \cdot 309 = 618 \text{ kHz}$$

Vypočtená hodnota 618 kHz je přibližně rovna změřené hodnotě 619 kHz.

4. Jednotka V odpovídá napětíové úrovni signálu. Jednotka dBm je výkonová úroveň signálu měřená v decibelech dB vyjádřených vzhledem k 1 mW, přičemž výkon je vztažen ke jmenovité hodnotě vstupní impedance analyzátoru (obvykle 50 Ω). Platí vztahy:

$$L = 10 \log \left(\frac{P}{10^{-3}} \right) \quad (2)$$

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3)$$

kde:

L [dBm].....úroveň signálu,

P [W]výkon analyzovaného signálu,

U [V].....velikost napětíového signálu,

$R = 50 \Omega$...vstupní impedance spektrálního analyzátoru.

1.5 Závěr

V laboratorní úloze jsme se naučili pracovat se spektrálním analyzátozem a rozšířili si své znalosti práce s osciloskopem o FFT analýzu.

Změřili jsme intenzitu rádiového signálu rozhlasových stanic a k jednotlivým stanicím jsme vyhledali název a příslušný vysílač. Zjistili jsme, že nejvíce stanic má vysílač v Dobroslavicích, Hošťálkovicích a na Radhošti.

Spektrálním analyzátozem a osciloskopem jsme dále analyzovali sinusový, trojúhelníkový a obdélníkový signál o frekvenci 308 kHz. Z výsledků měření je patrné, že nejvyšší napětíovou a výkonovou úroveň měla vždy první harmonická složka. Ve spektru byly rovněž přítomné vyšší harmonické složky, jejichž frekvence byla přibližně rovna celočíselnému násobku základní frekvence.